
KOOPERATIVE MOBILITÄT IN MEGASTÄDTEN



Markus Duchon

DISSERTATION

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Markus Duchon

München 2013

KOOPERATIVE MOBILITÄT IN MEGASTÄDTEN



Markus Duchon

DISSERTATION

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr. Hans Jürgen Ohlbach
1. Berichterstatterin:	Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
Tag der Einreichung:	11. Februar 2013
Tag der Disputation:	12. Juni 2013

Eidesstattliche Versicherung

(siehe Promotionsordnung vom 12.07.11, § 8, Abs. 2 Pkt. 5)

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die Dissertation von mir selbstständig, ohne unerlaubte Beihilfe angefertigt ist.

Markus Duchon

Danksagung

Mein spezieller Dank richtet sich an Frau Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, die mir die Möglichkeit zur Promotion als externer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile und Verteilte Systeme an der Ludwig-Maximilians-Universität gegeben hat. Herrn Prof. Dr. Busch danke ich ganz herzlich für die Übernahme der Zweitberichterstattung und Herrn Prof. Dr. Ohlbach für den Vorsitz der Promotionskommission. Ein ganz besonderer Dank geht an Dr. Cornel Klein, der mich von Seite der Siemens Corporate Technology betreut und stets darin unterstützt hat, den Inhalt meiner Arbeit nach eigenen Interessen zu gestalten.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen - sowohl bei Siemens als auch am Lehrstuhl - für die zahlreichen fachlichen und konstruktiven Diskussionen im Zusammenhang mit meiner Arbeit sowie bei gemeinsamen Forschungsprojekten. Namentlich hervorzuheben sind dabei besonders Michael Dürr, Robert Lasowski, Florian Gschwandtner, Kim Schindhelm und Kevin Wiesner, die mich auch abseits meines Promotionsvorhabens in dieser Zeit begleitet haben. Für den Rückhalt, die Geduld und das Verständnis geht ein außerordentlicher Dank an meine Freunde und vor allem an meine Familie, die mich stets gefördert und bei der Erreichung meiner Ziele unterstützt hat. Zum erfolgreichen Abschluss meiner Promotion haben dabei insbesondere Sandra, Alex, Renate, Peter und Gerald beigetragen. Von ganzem Herzen danke ich schließlich meiner Frau Petra, die mir in sämtlichen Phasen zur Seite stand und mich, zusammen mit unserem Sohn Leon, an das Leben neben der Arbeit erinnert hat.

Kurzfassung

Mobilität in Form des Transports von Waren und Personen ist ein wesentlicher Bestandteil unserer heutigen Gesellschaft, da diese einen enormen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und das soziale Leben hat. Nichts verkörpert die Begriffe Individualität, Flexibilität und Freiheit mehr als das eigene Auto und ist - in der Masse - gleichzeitig deren größte Bedrohung. Insbesondere in Megastädten konzentrieren sich die mit dem Verkehr verbundenen Probleme, die neben Staus auch zu einer überlasteten Infrastruktur führen und erhebliche Konsequenzen für die Umwelt nach sich ziehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden einige Ansätze vorgestellt und deren technische Umsetzung erläutert. Aus Sicht der Benutzer werden Anwendungen zur Förderung des kollektiven und gemeinschaftlichen Transports sowie ein Ansatz zur gemeinschaftlichen Parkraumverwaltung präsentiert. Im Anschluss wird aus der Sicht der Mobilitätsanbieter ein kooperativer Ansatz für einen flexiblen und bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transportdienst beschrieben. Abschließend wird auf ein System zur gemeinschaftlichen Schadstoffüberwachung eingegangen, welches einerseits eine detaillierte Grundlage für Infrastrukturbetreiber und Stadtplaner bietet und andererseits als Basis für umweltsensitive Anwendungen genutzt werden kann. Mit der Unterstützung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Kombination mit mobilen Endgeräten sowie auf der Basis des gemeinschaftlichen Zusammenwirkens, leisten die entwickelten Anwendungen und Systeme damit einen Beitrag zur Förderung einer effizienten und nachhaltigen Mobilität in Megastädten.

Abstract

Mobility in terms of transportation of persons and goods is an essential part of our society today, as it has a huge impact on the economy and the social life. Nothing embodies the concepts of individuality, flexibility and freedom more than owning a car, which - in bulk - is also their greatest threat. Problems associated with traffic are concentrated especially in megacities and besides congestion cause an overburdened infrastructure and have serious consequences for the environment.

In the context of this work, different approaches will be presented and explained. From the perspective of the users, applications to leverage collective and collaborative transport as well as an approach for cooperative parking space management will be illustrated. In the following, from the point of view of mobility providers, a cooperative approach for a flexible and demand-responsive door-to-door transportation service is described. Finally, a system for joint monitoring of pollutants will be explained which on the one hand provides a detailed basis for infrastructure managers and urban planners, and on the other hand can be used as a basis for environmentally sensitive applications. With the support of information and communication technologies in combination with mobile devices as well as on the basis of the community interaction, the developed applications and systems, thus contributing to the promotion of efficient and sustainable mobility in megacities.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziele der Arbeit	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Mobilität und Verkehr in Megastädten	7
2.1	Begriffsdefinitionen	7
2.1.1	Kooperation und Kollaboration	7
2.1.2	Mobilität	8
2.1.3	Megastädte	9
2.2	Herausforderungen zukünftiger Mobilität	11
2.3	Aufgaben und Anforderungen der Akteure	13
2.3.1	Akteure für Mobilität in Megastädten	14
2.3.2	Grundlegende Anforderungen für Mobilität in Megastädten	17
2.4	Klassifikation von Mobilitätsanwendungen und -dienstleistungen	20
2.4.1	Intelligente Transportsysteme	21
2.4.2	Projekte im Zusammenhang mit ITS	22
2.4.3	Thematische Abgrenzung und adressierte Bereiche der Arbeit	25
2.5	Zusammenfassung	27
3	Forschungsarbeiten aus den adressierten ITS Bereichen	29
3.1	Reiseinformationen	29
3.1.1	Mobile Routenplanung und Navigation	29
3.1.2	Informationen über Mobilitätsalternativen	32
3.2	Verkehrsmanagement	35
3.2.1	Gemeinschaftliches Parkplatzmanagement	36
3.3	Öffentlicher Verkehr	38
3.3.1	Bedarfsorientierter Transport	38
3.4	Umweltüberwachung	42
3.4.1	Überwachung von Umweltbedingungen	42
3.5	Zusammenfassung	45
4	Grundlagen kooperativer Mobilität	47
4.1	Drahtlose Kommunikation	47
4.1.1	Technologien zur drahtlosen Kommunikation	48
4.1.1.1	Infrastrukturbasierte Netzwerke	48
4.1.1.2	Ad hoc Netzwerke	51

4.1.2	Modelle verteilter Kommunikation	53
4.1.2.1	Client-Server Modell	53
4.1.2.2	Peer-to-Peer Modell	53
4.2	Verwaltung geografischer Informationen	54
4.2.1	Geoinformationssysteme	55
4.2.2	Verfahren zur hierarchischen Unterteilung von Räumen	56
4.3	Routen- und Tourenplanung	60
4.3.1	Modellierung von Wegnetzen	60
4.3.1.1	Berechnung von kürzesten Wegen	61
4.3.2	Klassen und Ansätze zur Lösung von Tourenplanungsproblemen	63
4.3.2.1	Exakte Verfahren	64
4.3.2.2	Klassische heuristische Verfahren	66
4.3.2.3	Metaheuristiken	68
4.3.3	Kooperativer Ansatz zur Lösung dynamischer Tourenplanungsprobleme	69
4.3.3.1	Das Prinzip der dynamischen Transferknoten	70
4.3.3.2	Grundlegende Funktionsweise des kooperativen Verfahrens	71
4.4	Geostatistische Verfahren für räumliche Daten	77
4.4.1	Stochastischer Prozess	78
4.4.2	Inverse Distance Weighting	78
4.4.3	Kriging zur räumlichen Interpolation	79
4.4.3.1	Semivarianz und Semivariogramm	79
4.4.3.2	Ordinary Kriging	82
4.4.3.3	Block Kriging	84
4.4.4	Land Use Regression Verfahren	84
4.5	Zusammenfassung	86
5	Anwendungen und Systeme für kooperative Mobilität	89
5.1	Anwendungen zur Bereitstellung von Reiseinformationen für Benutzer	90
5.1.1	Mobile Anwendung zur Routenplanung im öffentlichen Verkehr	90
5.1.1.1	Szenario	92
5.1.1.2	Systemüberblick	92
5.1.1.3	Diskussion	98
5.1.2	Dynamische Bildung von Fahrgemeinschaften	99
5.1.2.1	Szenario	100
5.1.2.2	Systemüberblick	101
5.1.2.3	Diskussion	109
5.2	Ein System zur Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs im Bereich des Verkehrsmanagements	111
5.2.1	Kollaboratives Parkplatzmanagement	111
5.2.1.1	Systemüberblick	112
5.2.1.2	Prototyp und Ergebnisse einer Nutzerstudie	121
5.3	Bedarfsorientierte Tür-zu-Tür Transportsysteme in urbanen Regionen	124
5.3.1	Verfahren des kooperativen Ansatzes	124

5.3.1.1	Zentrales Verfahren	125
5.3.1.2	Unterstützendes Verfahren	127
5.3.1.3	Verteiltes Verfahren	128
5.3.1.4	Qualitative Bewertung der Verfahren	130
5.3.2	Simulationsumgebung für den bedarfsorientierten Transport	134
5.3.2.1	Datenbasis	134
5.3.2.2	Funktionalität und Konfigurationsmöglichkeiten	135
5.3.2.3	Umsetzung der Verfahren und Mechanismen	137
5.3.3	Einsatzmöglichkeiten der kooperativen Verfahren	141
5.3.3.1	Initiale Experimente	141
5.3.3.2	Logistik - Kooperativer Warentransport in Afrika	146
5.3.3.3	DTNs für den bedarfsorientierten Transport in Barcelona und München	152
5.3.3.4	Analyse unterschiedlicher Gewichtungskonfigurationen	162
5.3.3.5	DTN System im Vergleich zum öffentlichen Nahverkehr in London	170
5.3.3.6	Zusammenfassung der quantitativen Untersuchungen	175
5.4	Ein System zur Umweltüberwachung und die weitergehende Nutzung von Um- weltinformationen	177
5.4.1	System zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen	178
5.4.1.1	Systemüberblick	179
5.4.1.2	Evaluierung	189
5.4.2	Der gesunde Weg: Eine Anwendung auf Basis von Umweltinformationen	192
5.4.2.1	Expositionsmodell	193
5.4.2.2	Routenplanung basierend auf Schadstoffinformationen	195
5.4.2.3	Evaluierung der Routenplanung basierend auf Schadstoffinfor- mationen	196
5.5	Zusammenfassung	199
6	Zusammenfassung und Ausblick	205
6.1	Zusammenfassung	205
6.2	Ausblick	208
	Abbildungsverzeichnis	211
	Tabellenverzeichnis	215
	Literaturverzeichnis	217

EINLEITUNG

Lebten im Jahr 1950 lediglich 28% der Weltbevölkerung in Städten, so rechnen die Vereinten Nationen damit, dass im Jahr 2030 der Anteil auf knapp 60% steigen wird [315]. Dieser Verstädterungstrend wird sich nach Prognosen auch in Zukunft weiter fortsetzen, so dass im Jahr 2050 fast 70% der Menschen in Städten leben werden. In diesem Zusammenhang ist auch die Anzahl der Millionenstädte gestiegen. Im Gegensatz zu den 86 existierenden Millionenstädten im Jahr 1950, waren es zur Jahrtausendwende 387. Parallel zu der steigenden Anzahl von Städten, die die Einwohnergrenze von einer Millionen überschritten haben, wächst auch die Anzahl der Städte mit mehreren Millionen Einwohnern. Je nach Definition, werden Metropolen zwischen 5 und 10 Millionen Einwohnern mit dem Begriff Megastadt bezeichnet. Mittlerweile bewegen sich zahlreiche dieser Metropolen auf eine Grenze von mehr als 20 Millionen Einwohnern zu, für die die Vereinten Nationen [314] bereits den Begriff Hyperstadt geprägt haben. Aktuell wird die Liste dieser Städte von Tokio mit rund 38 Millionen Einwohnern angeführt und setzt sich aus insgesamt 6 Metropolen bzw. Ballungszentren zusammen. Ein wesentlicher Grund für den anhaltenden Wachstumstrend ist die ökonomische Bedeutung, die den entsprechenden Metropolen zukommt. Ein Maß hierfür ist das weltweite Bruttoinlandsprodukt, welches zu schätzungsweise 80% in urbanen Regionen generiert wird. Insbesondere wirtschaftlich schwächere Staaten stehen vor dem Problem, dass durch den Zuzug der Landbevölkerung der Ausbau der städtischen Infrastruktur nicht mit dem Wachstum der Städte mithalten kann. Während in Entwicklungs- und Schwellenländern oft auch die essentielle Infrastruktur, wie beispielsweise die Versorgung mit Trinkwasser, betroffen ist, steht in den Metropolen der Industrieländer nicht der Ausbau, sondern vielmehr eine effizientere Nutzung, beispielsweise der Transportinfrastruktur, im Vordergrund.

Im Allgemeinen hat eine sehr hohe Bevölkerungsdichte eine starke Belastung für die Infrastruktur zur Folge und stellt insbesondere Megastädte vor große Herausforderungen. Diese wurden im Rahmen einer Studie untersucht, bei der eines der hervorstechenden Probleme die Transportinfrastruktur und den darauf stattfindenden Verkehr betrifft [53]. Das durch die hohen Einwohnerzahlen bedingte Verkehrsaufkommen hat weitreichende Konsequenzen auf unterschiedliche Bereiche. Dabei sind der Transport von Waren und Personen wesentliche Faktoren, die die ökonomische und ökologische Wettbewerbsfähigkeit maßgeblich beeinflussen. Eine schlecht geplante oder überlastete Transportinfrastruktur hat dabei Auswirkungen auf die Lebensqualität, da der Verkehrslärm und die Abgase die Gesundheit der städtischen Bevölkerung beeinträchtigen. Ein stockender Verkehrs

hat unter anderem einen höheren Energiebedarf und die damit verbundenen Mehrkosten sowie steigende Fahrzeiten zur Folge, was sich wiederum auf die Leistungsfähigkeit der Volkswirtschaft auswirkt. Zusätzlich zum Platzbedarf für die Transportinfrastruktur stellt der gesteigerte Energieverbrauch und der damit verbundene Schadstoffausstoß auch eine erhebliche Belastung für die Umwelt dar. Im Hinblick auf die wachsende Verkehrsdichte in Metropolregionen steigt auch das Gefahrenpotenzial im und durch den Straßenverkehr und führt zu zahlreichen Personen- und Sachschäden. Bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Verkehrssituation müssen daher unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden, um eine effiziente, sichere und nachhaltige Nutzung der vorhandenen Ressourcen zu gewährleisten.

Der Bereich intelligenter Verkehrs- oder Transportsysteme versucht unter anderem mit Hilfe von geografischen Informationen und dem Einsatz moderner Kommunikationstechnologien den verkehrsbezogenen Herausforderungen zu begegnen. Neben der eigentlichen Kommunikation standen in den letzten Jahren vor allem Möglichkeiten und Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur Optimierung des Verkehrs im Vordergrund.

Im Hinblick auf die Kommunikation ergeben sich insbesondere durch die Entwicklungen im Bereich der mobilen Systeme erweiterte Einsatzmöglichkeiten. Die Nutzung und Verwendung mobiler Endgeräte, beispielsweise in Form moderner Smartphones, erfolgt bereits in einigen Teilbereichen der Mobilität. Die über das mobile Internet nutzbaren Dienste und Anwendungen reichen dabei von einer einfachen Fahrplanauskunft, über Reservierungs- und Bezahlungsmöglichkeiten von Leihfahrrädern oder anderen Verkehrsmitteln bis hin zu Orientierungs- und Navigationshilfen. Entsprechende Geräte erlauben dabei sowohl den reinen Informationsabruf als auch die Erfassung aktueller Kontextinformationen mit Hilfe unterschiedlicher Sensoren sowie deren Verarbeitung. Der verkehrsrelevante Kontext, wie beispielsweise die Position, die Zeit und das Ziel eines Benutzers, umfasst aber auch Bewegungsmuster oder Umweltinformationen. Die Nutzung von Kontextinformationen sowie deren weitere gemeinschaftliche Verwendung können dazu beitragen, die vorhandene Verkehrsinfrastruktur effizienter zu nutzen und diese dadurch zu entlasten. Unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten zum Datenaustausch können die verfügbaren Informationen zur Kooperation sowohl in unmittelbarer Umgebung verwendet als auch einer breiten Masse zur gemeinschaftlichen Nutzung bereitgestellt werden.

1.1 Ziele der Arbeit

Im Hinblick auf die steigende Anzahl von Megastädten und der damit verbundenen Bevölkerungsdichte konzentrieren sich vor allem in diesen Metropolen die aus dem Verkehr resultierenden Probleme. Das wachsende Bedürfnis nach Mobilität hat neben einer überlasteten Infrastruktur auch einen erheblichen Einfluss auf die Umwelt und stellt die verantwortlichen Akteure damit vor große Herausforderungen. In der Vergangenheit wurde den bestehenden Verkehrsproblemen oft mit dem Ausbau und der Erweiterung der Verkehrsinfrastruktur begegnet. Eine alternative Vorgehensweise wird durch die Einführung intelligenter Transportsysteme verfolgt, mit deren Hilfe die vorhandenen Verkehrsnetze auf

sichere, koordinierte und intelligente Weise genutzt werden können. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer. Im Rahmen der Vernetzung, die eine Kommunikation zwischen und einen Informationsaustausch unter den beteiligten Akteuren ermöglicht, ergeben sich durch die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet mobiler und verteilter Systeme neue Möglichkeiten zur Umsetzung von Anwendungen und innovativen Diensten, die auf Basis der Kooperation zu einer effizienteren Mobilität beitragen.

In der vorliegenden Arbeit werden einige Möglichkeiten für den Einsatz und die Verwendung mobiler Endgeräte im Verkehrswesen aufgezeigt, die durch die Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung relevanter Daten, die verschiedenen Akteure mit umfassenden Informationen versorgen und sie dadurch in die Lage versetzen, die vorhandenen Ressourcen besser zu nutzen. In Verbindung mit diesen Informationen werden Ansätze zur Kooperation für unterschiedliche Bereiche vorgestellt und deren Potenzial zur Verbesserung der Mobilität in dicht besiedelten Gebieten untersucht.

Konkret setzt sich die Arbeit mit den 4 Bereichen: Reiseinformationen, Verkehrsmanagement, Öffentlicher Verkehr und Umweltüberwachung auseinander. Hinsichtlich der Reiseinformationen wurden Anwendungen für mobile Endgeräte entwickelt, die den Benutzern, basierend auf lokal zur Verfügung stehenden Informationen eine exible Nutzung kollektiver sowie gemeinschaftlicher Mobilitätsangebote ermöglichen. Im Rahmen des Verkehrsmanagements wird, mit Hilfe der Kontexterfassung und -verarbeitung durch moderne Smartphones, ein System zum gemeinschaftlichen Parkraummanagement vorgestellt, um eine Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs zu erreichen. Mit Bezug zum Bereich des öffentlichen Verkehrs wurde zur Umsetzung des bedarfsorientierten Transports in Megastädten ein neues kooperatives Verfahren zur Lösung hoch dynamischer Tourenplanungsprobleme entwickelt und evaluiert. Bezüglich der Umweltüberwachung realisiert das entworfene System die Verarbeitung und Visualisierung von stark verteilten georeferenzierten Messwerten und ermöglicht deren weitere Verwendung für verkehrsrelevante Anwendungen. Insgesamt können diese Anwendungen und Systeme mit der Unterstützung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Kombination mit mobilen Endgeräten sowie auf der Basis des gemeinschaftlichen Zusammenwirkens einen Beitrag zur Förderung einer effizienten und nachhaltigen Mobilität in Megastädten leisten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Dieser Abschnitt stellt den Aufbau und die Struktur der Arbeit vor und gibt einen Überblick über die Vorgehensweise. Kapitel 2 befasst sich zunächst mit den wesentlichen Begriffen: Kooperation, Mobilität und Megastädte, die für den Rahmen dieser Arbeit definiert werden, bevor genauer auf die angesprochenen Herausforderungen und Probleme im Zusammenhang mit der Mobilität eingegangen wird. In den darauf folgenden Abschnitten werden sowohl die für die vorliegende Arbeit relevanten Akteure identifiziert sowie deren Aufgaben und Anforderungen vorgestellt. Im Anschluss folgt ein Überblick über das Forschungsgebiet der intelligenten Transportsysteme, das unterschiedliche Bereiche und Aspekte der Mobilität umfasst. Basierend auf diesen Bereichen, zu denen Forschungsprojekte vorgestellt werden,

erfolgt eine Klassifizierung, die für die Eingrenzung und Fokussierung der Arbeit verwendet wird.

In Kapitel 3 werden verwandte Arbeiten aus den adressierten Bereichen im Zusammenhang mit der Mobilität vorgestellt. Dabei werden sowohl Forschungsprojekte als auch industrielle bzw. im Einsatz befindliche Systeme behandelt und deren Funktionsweise beschrieben. Die Arbeiten aus den unterschiedlichen Bereichen werden analysiert und anhand geeigneter Parameter gegenübergestellt.

Kapitel 4 erläutert die notwendigen Grundlagen für die Umsetzung von Anwendungen und Systemen zur Realisierung kooperativer Mobilität. Die Kooperation basiert im Wesentlichen auf dem Informationsaustausch zwischen den beteiligten Entitäten, weshalb die Kommunikation einen essentiellen Bestandteil entsprechender Systeme darstellt. Diesbezüglich werden verschiedene Kommunikationstechnologien beschrieben, die sich für den Einsatz im Rahmen der Mobilität eignen. Neben den technischen Voraussetzungen zur Kommunikation, werden im weiteren Verlauf zwei grundlegende Modelle zur verteilten Kommunikation bzw. Dienstnutzung diskutiert, über die der für die Kooperation erforderliche Datenaustausch erfolgen kann. Der nächste Abschnitt befasst sich mit der Verwaltung geografischer Informationen. Mit Hilfe von Geoinformationssystemen können die für die Mobilität relevanten Daten, beispielsweise in Form von Straßen- oder Verkehrsnetzen, effizient gespeichert, verwaltet und verwendet werden. Des Weiteren eignen sich diese Systeme für die Speicherung von weiteren Informationen, die einen räumlichen Bezug aufweisen. Im Hinblick auf die Verwendung mobiler Endgeräte, die in der Regel über begrenzte Ressourcen bezüglich Rechenleistung, Arbeitsspeicher und Speicherkapazität verfügen, werden zusätzlich Verfahren zur hierarchischen Unterteilung von Räumen aufgezeigt. Im Anschluss wird auf die Routen- bzw. Tourenplanung eingegangen, die sich in erster Linie mit dem Problem der Suche nach dem kürzesten oder kostengünstigsten Weg auseinandersetzt und daher bei zahlreichen verkehrsrelevanten Anwendungen und Systemen verwendet wird. Neben der verhältnismäßig einfachen Routenplanung existieren wesentlich komplexere kombinatorische Problemstellungen in Verbindung mit der Tourenplanung, die sich unter anderem aus dem Transport von Personen oder Waren von und zu mehreren unterschiedlichen Bestimmungsorten ergeben. In diesem Zusammenhang werden die wesentlichen Klassen und gängigen Lösungsansätze erläutert. Insbesondere zur Lösung von dynamischen Tourenplanungsproblemen wird zudem der entwickelte kooperative Ansatz auf Basis des Prinzips der dynamischen Transferknoten vorgestellt. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden geostatistische Verfahren erörtert, wobei neben den statistischen Grundlagen auch unterschiedliche Ansätze und Methoden behandelt werden, mit deren Hilfe sich punktuelle georeferenzierte Messwerte in flächendeckende Messdaten überführen lassen.

Kapitel 5 stellt unter Verwendung der behandelten Grundlagen eigene Anwendungen und Systeme für jeden der adressierten Bereiche vor. Im Bereich der Reiseinformationen wird zunächst eine lokal auf dem Endgerät arbeitende Anwendung zur Routenplanung im öffentlichen Verkehr beschrieben, die eine kontextabhängige Aktualisierung der Route realisiert. Im Folgenden wird eine Anwendung vorgestellt, die mit Hilfe eines verteilten Verfahrens zum Routenabgleich die Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften unterstützt. Zusätzlich werden hierbei Positionsdaten genutzt, um das Auffinden der beteiligten Benutzer und damit die Kooperati-

on zwischen diesen zu ermöglichen. Im Hinblick auf den Bereich des Verkehrsmanagements wird im zweiten Abschnitt ein kollaboratives System zur Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs, dessen Umsetzung sowie die Ergebnisse einer Nutzerstudie präsentiert. Das System realisiert die automatische Erkennung von Parkvorgängen mit Hilfe moderner Smartphones. Im Anschluss wird ein bedarfsorientiertes Tür-zu-Tür Transportsystem auf Basis des in den Grundlagen vorgestellten Ansatzes zur Lösung dynamischer Tourenplanungsprobleme unter Verwendung des Prinzips der dynamischen Transferknoten präsentiert. Die hierfür entwickelten Verfahren werden sowohl qualitativ bewertet als auch für unterschiedliche Einsatzgebiete mit Hilfe von Simulationen quantitativ untersucht. Im letzten Abschnitt wird ein System zur Umweltüberwachung aufgezeigt, welches gemeinschaftlich erfasste Informationen über die Luftqualität verarbeitet und visuell aufbereitet. Des Weiteren werden diese Informationen von einer Anwendung verwendet, die die Berechnung einer schadstoffarmen oder gesunden Route ermöglicht. Im letzten Kapitel werden die Arbeit und die Ergebnisse zusammengefasst sowie ein Ausblick für zukünftige und nachhaltige Mobilität in Megastädten gegeben.

MOBILITÄT UND VERKEHR IN MEGASTÄDTEN

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Begriffe Kooperation und Mobilität anhand von Definitionen in den Rahmen dieser Arbeit eingeordnet. Megastädte, in denen sich die Probleme im Zusammenhang mit der Mobilität und dem dabei entstehenden Verkehr konzentrieren, stellen hierbei den Kontext dar und werden im weiteren Verlauf genauer betrachtet. Darauf basierend werden die wesentlichen Herausforderungen nachhaltiger und zukünftiger Mobilität vorgestellt und erläutert. Anschließend werden die involvierten Akteure identifiziert und deren Aufgaben und Anforderungen diskutiert. Am Ende dieses Kapitels werden unterschiedliche Anwendungen und Systeme aus dem Bereich der intelligenten Transportsysteme sowie damit assoziierte Projekte, vorgestellt und klassifiziert. Ausgehend von dieser Klassifizierung werden die Schwerpunkte dieser Arbeit festgelegt und die damit verbundenen Teilbereiche adressiert.

2.1 Begriffsdefinitionen

In den folgenden Abschnitten werden die Begriffe des Titels genauer betrachtet sowie deren Bedeutung anhand unterschiedlicher Definitionen abgeleitet und für den weiteren Verlauf dieser Arbeit definiert. Anschließend werden die wesentlichen Charakteristika von Megastädten, in denen sich die heutige Mobilität konzentriert und die damit im Zusammenhang stehenden Probleme potenzieren, vorgestellt.

2.1.1 Kooperation und Kollaboration

Dem allgemeinen Verständnis nach ist eine Kooperation ein Zusammenschluss unterschiedlicher Unternehmen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Weerth definiert eine Kooperation aus betriebswirtschaftlicher Sicht als die Zusammenarbeit unterschiedlicher Intensität, zeitlicher Dauer und Zielrichtung zwischen rechtlich und wirtschaftlich selbstständigen Unternehmen zur Steigerung der gemeinsamen Wettbewerbsfähigkeit [322]. Bei Gerth steht ebenfalls der wirtschaftliche Aspekt im Vordergrund und er beschreibt die Kooperation als das Zusammenwirken von Betriebswirtschaften, bei welchen durch einzelbetriebliche Ausgliederung und kollektive Ausübung von Aufgaben die wirtschaftliche Situation der kooperierenden Betriebswirtschaften verbessert werden soll [88]. Mit Bezug auf die Verkehrsdomäne beschreibt Tsukada kooperative intelligente Transportsysteme (kooperative ITS) als Systeme, bei denen Fahr-

zeuge, die Straßeninfrastruktur, zentrale Kontrollzentren und andere Entitäten untereinander Informationen austauschen, um dadurch eine bessere Verkehrssicherheit, eine höhere Effizienz und einen höheren Komfort für die Verkehrsteilnehmer sicherzustellen [311]. Eine etwas umfassendere Definition für ein solches kooperatives System liefert die europäische Kommission, nach der Straßennetzbetreiber, Infrastruktur, Fahrzeuge, ihre Fahrer und andere Straßenbenutzer kooperieren um eine effiziente, sichere und angenehme Fahrt zu ermöglichen. Dabei ist die Kommission überzeugt, dass zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur kooperierende Systeme über die Möglichkeiten isolierter Systeme hinaus zur Erreichung dieser Zielsetzung beitragen werden [132]. Ein zur Kooperation verwandter Begriff ist die Kollaboration, bei der insbesondere die Kommunikation und der damit verbundene Austausch von Informationen im Vordergrund steht. Kollaboration bezeichnet die Zusammenarbeit eines Unternehmens mit seinen Kunden und Lieferanten unter Einsatz von modernen Informationstechnologien als neue Art der Integration von unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Geschäftsprozessen [130]. Dabei bilden die Kommunikationsstrukturen und der dadurch mögliche Informationsaustausch die wesentliche Grundlage für die Zusammenarbeit der beteiligten Akteure.

Unter Berücksichtigung dieser Definitionen werden im Folgenden die Begriffe Kooperation und Kollaboration verwendet, um eine gemeinschaftliche und teilweise auch domänenübergreifende Zusammenarbeit mit unterschiedlicher Intensität und von bestimmter Dauer zwischen den direkt oder indirekt beteiligten Akteuren zu beschreiben. Diese Zusammenarbeit richtet sich dabei nicht nur auf die unterschiedlichen Akteure und den Austausch von Informationen, die zur Durchführung von Geschäftsprozessen notwendig sind, sondern schließt auch abstraktere, kontextabhängige Zusammenarbeit unterschiedlicher oder gleicher Entitäten mit ein. Die gemeinsamen Ziele des kooperativen oder kollaborativen Mobilitätsprozesses beziehen sich im Wesentlichen auf den Austausch von lokal vorhandenen Informationen, um eine effizientere Nutzung von Ressourcen zu gewährleisten. Dadurch soll sowohl die Wahrnehmung von Mobilitätsmöglichkeiten und damit deren Auslastung gesteigert als auch eine Verbesserung der Dienstqualität und der damit verbundenen Kundenzufriedenheit erreicht werden.

2.1.2 Mobilität

In der Informatik wird der Begriff der Mobilität, insbesondere im Umfeld mobiler Systeme, häufig mit Endgeräte-, Benutzer- bzw. Dienstmobilität assoziiert. Dabei bedeutet Endgerätemobilität, dass der Nutzer mit seinem Endgerät den Standort verändert und trotzdem einen (permanenten) Zugriff auf das Kommunikationsnetzwerk hat. Die Benutzermobilität besagt, dass lediglich der Benutzer seinen Standort verändert und in diesem Fall zwischen den Endgeräten wechselt, wobei ein Identifikationsmerkmal zur Erkennung des Benutzers notwendig ist. Die Dienstmobilität ermöglicht die ortsunabhängige Nutzung eines bestimmten Dienstes, wie beispielsweise eines elektronischen Postfachs. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird mit dem Begriff Mobilität die Beweglichkeit verbunden. Aus der Perspektive der Soziologie, wird mit der sozialen Mobilität der gesellschaftliche Auf- bzw. Abstieg verbunden und beschreibt den Wechsel sozialer Rollen, der Position oder des Status. Der soziale Status und die damit verbundenen Mittel haben ebenfalls einen entsprechenden Einfluss auf die Mobilität. Nach [289] kann zusätzlich zwischen vertikaler und horizontaler Mobilität unterschieden werden,

wobei die vertikale Mobilität den Wechsel zwischen unterschiedlichen Gesellschaftsschichten beschreibt und die horizontale Mobilität die Bewegung innerhalb einer Gesellschaftsschicht. Dabei kann die horizontale Mobilität noch in geistige und räumliche Mobilität unterteilt werden, wobei die geistige Mobilität die Flexibilität des Denkens bezeichnet und die räumliche Mobilität die physische Mobilität, also die Bewegung im Raum beschreibt. Die Verkehrswissenschaften setzen sich mit unterschiedlichen Ausprägungen der räumlichen Mobilität auseinander. Die Alltagsmobilität ist dabei von zentraler Bedeutung und beschreibt eine regelmäßige Ortsveränderung, die in potentielle und realisierte Mobilität unterteilt werden kann [307]. Die potentielle Mobilität beschreibt die Möglichkeit zur Ortsveränderung und hängt von der Dichte oder Erreichbarkeit des Mobilitätsangebotes ab. Unter der realisierten Mobilität wird die tatsächliche Ortsveränderung verstanden, mit der eine verkehrserzeugende Bewegung ausgeführt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Mobilität in erster Linie als ein Ortswechsel zu verstehen und bezieht sich damit auf die Transport- bzw. Logistikdomäne, abhängig davon, ob Personen oder Waren von einem Ort zu einem anderen gebracht werden. Im Gegensatz dazu wird in der Literatur der Begriff Mobilität häufig nur im Zusammenhang mit Personen verwendet und ist im Güter- oder Warenverkehr unüblich, da die Mobilität nach [87] eine selbstständige Fortbewegung voraussetzt. Neben dem Ortswechsel umfasst die Mobilität aber auch weitere damit verbundene Aspekte, die sich hauptsächlich auf die Verkehrsdomäne beziehen. Die potenzielle Mobilität adressiert hierbei Informationen über die zur Verfügung stehenden Mobilitätsmöglichkeiten und -angebote. Die verkehrsverursachende Durchführung der Mobilität, die auch als realisierte Mobilität verstanden wird, kann entweder eigenständig oder durch geeignete Anbieter und Dienstleister erfolgen. Letztere konzentrieren sich in diesem Zusammenhang auf eine effiziente und für den Benutzer attraktive und kostengünstige Umsetzung. Da jegliche Realisierung von Mobilität eine verkehrserzeugende Wirkung hat, steht diese im direkten Zusammenhang mit dem Verkehr und dessen Auswirkungen. Diesbezüglich werden auch Aspekte aus den Bereichen des Verkehrsmanagements und der Umweltüberwachung berücksichtigt. Im Zuge der vermehrten Nutzung und den Möglichkeiten mobiler Endgeräte spielen auch diese, zusammen mit den eingangs erwähnten Begriffen, eine maßgebliche Rolle bei der Nutzung und Bereitstellung von Informationen und Angeboten im Zusammenhang mit der räumlichen Mobilität.

2.1.3 Megastädte

Megastädte, in denen sich die Probleme im Zusammenhang mit der Mobilität konzentrieren, stellen letzten Endes den Kontext dar, in dem die kooperative Mobilität realisiert werden soll. Im Rahmen der Arbeit steht damit der innerstädtische Verkehr im Vordergrund, wobei einige Ansätze auch auf die überregionale oder internationale Mobilität zwischen einzelnen Städten transferiert werden können. Der Fokus liegt dennoch auf urbanen Regionen, in denen ein stärkeres Verkehrsaufkommen herrscht und auch die Auswirkungen von Mobilität auf Grund der hohen Bevölkerungsdichte besonders deutlich werden. Der Trend der Verstädterung und die Bildung neuer Megastädte oder Metropolregionen wird sich weiter fortsetzen und hat damit einem Anstieg des Mobilitätsbedarfs sowie des daraus resultierenden

Verkehrsaufkommens zur Folge. Nach den Prognosen der Vereinten Nationen (englisch: United Nations, UN) lebt mittlerweile mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Siedlungsräumen [314]. In den nächsten 30 bis 40 Jahren wird diese Zahl noch ansteigen, so dass 2050 rund 70% der Menschen weltweit in Städten wohnen werden. Allgemein lassen sich Städte oder urbane Regionen bezüglich ihrer Größe klassifizieren, wie z.B. Kleinstadt, Großstadt oder Megastadt. Bereits in den siebziger Jahren haben die UN den Begriff Megastadt eingeführt. Dieser stand zunächst für Städte mit mehr als 5, dann mehr als 8 und heute für Städte mit über 10 Millionen Einwohnern. Die bekanntesten Vertreter aktueller Megastädte sind unter anderem Tokio, Mexiko Stadt, New York, Seoul, Mumbai und London. Mittlerweile hat sich auch der Begriff Hyperstadt etabliert [314], wobei dieser für Städte mit mehr als 20 Millionen Einwohnern verwendet wird - mehr als die Einwohner Dänemarks, Norwegens und Schwedens zusammen. Nach Medienberichten [191, 148] plant China die Zusammenlegung von insgesamt neun Städten entlang des Perlsdeltas zu einer einzigen Mega- oder Hyperstadt mit insgesamt 42 Millionen Einwohnern. In den kommenden Jahren sollen hierfür zunächst die Grundlagen geschaffen werden, indem die Transport-, Energie-, Wasser- und Telekommunikationsinfrastrukturen der Städte vereint werden. Als Folge dieser Zusammenlegung erhoffen sich die Planer unter anderem wirtschaftliche und verkehrsbezogene Vorteile. Megastädte sind ein Anziehungspunkt für Handel, Industrie, Kultur sowie Wissen und bieten dadurch Vorteile, wie Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten, die allgemeine Grundversorgung mit Wasser und Strom sowie Museen, Theater, Kinos oder Hochschulen und Universitäten. Bezogen auf die Wirtschaft und nach Informationen der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (englisch: Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD) sowie den Prognosen von Price Waterhouse Coopers, die in [316] zusammengefasst sind, erwirtschaftet beispielsweise Tokio mit einem Anteil von 26,8% der nationalen Bevölkerung 34,1% des Bruttoinlandsproduktes (BIP). In London tragen 20,3% der Bevölkerung zu 25,4% des BIP bei, Sao Paulo erwirtschaftet mit 10,5% Bevölkerung rund 19,5% des BIP und Buenos Aires erreicht mit 32,5% Bevölkerungsanteil sogar 63,2% des BIP. Anhand dieser Zahlen wird ersichtlich, dass diese Metropolen nicht nur ein Anziehungspunkt sind, sondern auch Wachstumsmotoren der nationalen Volkswirtschaft.

In diesen großen Metropolen ballen sich auch Probleme, wie Überlastungen der Verkehrsnetze und Versorgungsinfrastrukturen, Wohnungsnot, Luftverschmutzung, soziale Spannungen und Kriminalität. Verstärkend auf diese Probleme wirkt sich zusätzlich die Geschwindigkeit des Wachstums aus, mit der der Ausbau der bestehenden Infrastruktur oft kaum Schritt halten kann. Im Vergleich zu London, dessen Bevölkerung in 150 Jahren von 1 Millionen auf über 8 Millionen gewachsen ist, dauerte es in Mexiko Stadt lediglich 50 Jahre bis die Grenze von 15 Millionen Einwohnern überschritten wurde. Vor diesem Hintergrund soll die kooperative Mobilität dabei helfen, den zahlreichen Problemen im Zusammenhang mit der Mobilität in den schnell wachsenden Megastädten zu begegnen. Dabei werden im weiteren Verlauf der Arbeit mögliche Lösungsansätze aufgezeigt und untersucht, die sich mit den Herausforderungen befassen. Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge werden im nächsten Abschnitt die wesentlichen Herausforderungen vorgestellt.

2.2 Herausforderungen zukünftiger Mobilität

In einer von der Siemens AG in Auftrag gegebenen Studie [53] wurden Interessenvertreter und Experten der jeweiligen Domänen von Megastädten, die in die Klassen aufstrebende Städte, Schwellenstädte und entwickelte Städte unterteilt wurden, bezüglich der wesentlichen Herausforderungen befragt. Dabei wurde bezüglich der Umwelt in erster Linie die Luftverschmutzung (26%), vor dem Verkehr (15%) und der allgemeinen Verschmutzung (14%) genannt. Bezüglich der sozialen Herausforderungen standen die schlechten Wohn- und Lebensbedingungen (14%), die Kluft zwischen Arm und Reich (11%) und die Armut (9%) im Vordergrund. Als die größte Herausforderung mit Bezug auf die Infrastruktur wurde über alle Städteklassen mit überwiegender Mehrheit von 17%, 43% bzw. 45% der Verkehr genannt. Dabei wird deutlich, dass das Verkehrswesen die Interessenvertreter mehr als alle anderen Fragen beschäftigt. In diesem Zusammenhang wurden als Hauptursachen für Verkehrsprobleme die begrenzten Ressourcen, die mangelhafte Planung und die unzureichende Infrastruktur genannt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen sind zur Bewältigung der zentralen Herausforderungen nachhaltige Konzepte für den Verkehr, effizientes Bauwesen und intelligente Energie- und Wasserversorgung gefragt. Hierfür müssen durch gemeinsames Handeln von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft innovative Lösungen erarbeitet werden, um eine nachhaltige Stadtentwicklung im Zusammenhang mit der Mobilität umzusetzen und die Wettbewerbsfähigkeit der Städte sowie die Lebensqualität der Bewohner zu erhalten oder zu verbessern [317].

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei auf die Verkehrsdomäne und entsprechende Konzepte für eine nachhaltige Mobilität in Megastädten. Da nahezu jede Megastadt mit erheblichen Verkehrsproblemen zu kämpfen hat, werden insbesondere dem Ausbau öffentlicher Verkehrssysteme große Entwicklungschancen eingeräumt. Luftverschmutzung und Staus sind dabei die logischen Konsequenzen eines starken Verkehrsaufkommens und den damit verbundenen ökologischen und ökonomischen Problemen. Diese Herausforderung ist damit ein Schlüsselfaktor bei dem es darum geht, neue Verkehrssysteme aufzubauen, den vorhandenen Verkehr effizienter zu gestalten und die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren. Bezüglich einer effizienteren Verkehrssteuerung haben die Verantwortlichen von Tokio im Jahr 2007 für rund 7 Milliarden Euro das derzeit beste Verkehrsleitsystem weltweit installiert. Mehr als 17000 Sensoren erfassen die Fahrzeuge und leiten die Informationen an eine Zentrale weiter. Von dort aus können unter anderem Ampeln und Informationstafeln gesteuert werden, um die Verkehrsströme besser zu verteilen. Obwohl das Verkehrsaufkommen seit 1990 um 50% gewachsen ist, hat die Verkehrsdichte durch die bessere Verteilung nicht zugenommen [281].

Die wesentliche Herausforderung aus Sicht der Interessenvertreter und Experten der genannten Studie ist es, die grundlegenden Anforderungen aus **Wettbewerbsfähigkeit**, **Lebensqualität** und **Umweltschutz** in Einklang zu bringen, insbesondere da sich diese teilweise konträr verhalten. Die Zusammenhänge und Auswirkungen bezüglich der Mobilität und deren Einfluss auf die jeweiligen Herausforderungen zeigt Abbildung 2.1. Die drei genannten Aspekte lassen sich zwar getrennt voneinander betrachten, aber auf Grund der

Komplexität sowie der vielfältigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in der Realität, kann der Weg zu einer nachhaltigen Mobilität lediglich durch eine Kombination von unterschiedlichen Ansätzen realisiert werden. Es ist allgemein anerkannt, dass die Mobilität

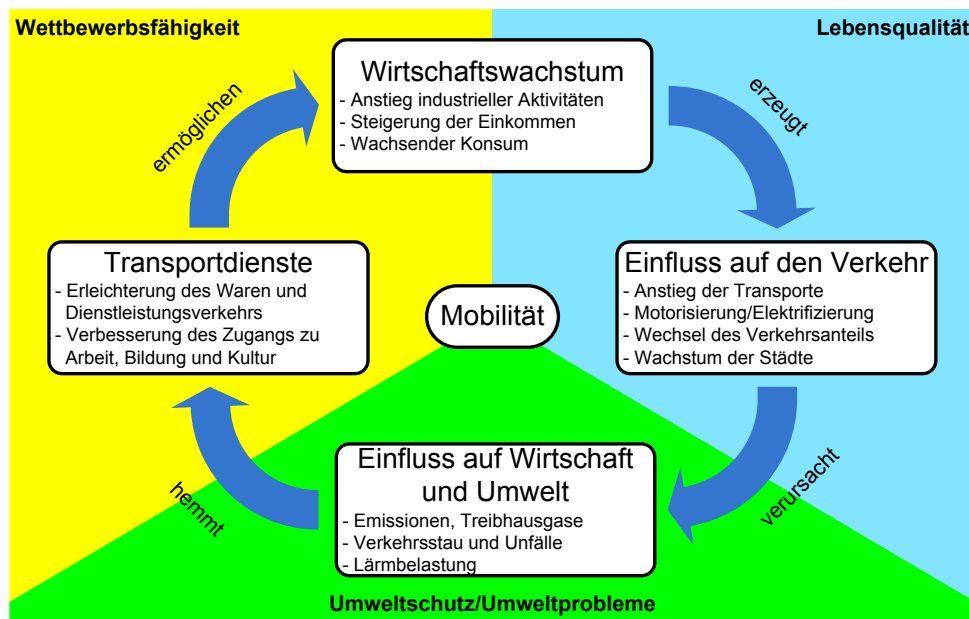


Abbildung 2.1: Herausforderungen und Abhängigkeiten nachhaltiger Mobilität [165, 304]

eine der wichtigsten Voraussetzungen zur Verbesserung der Lebensbedingungen darstellt. Durch eine Verbesserung der persönlichen Mobilität wird gleichzeitig der Zugang zu grundlegenden Diensten und Einrichtungen, aber auch zu solchen, die die Lebensqualität steigern, erleichtert. Auch eine Verbesserung des Warentransports führt zu einer großen Auswahl an unterschiedlichen Produkten zu erschwinglichen Preisen und ermöglicht eine effizientere Vermarktung und Herstellung. Im Zusammenhang mit der Mobilität hat die Erfolgsgeschichte des Automobils in den letzten hundert Jahren von der damit verbundenen Flexibilität in dem Sinne profitiert, dass die Benutzer selbst entscheiden können, wann und wohin sie fahren. Die Anzahl der Fahrzeuge wird sich weltweit nach Berechnungen in [304] bis 2050 verdreifachen. Diese Entwicklung und die dadurch entstandenen Probleme haben aber auch dazu beigetragen, dass die Menschen sich mehr und mehr bewusst werden, dass diese Art der Mobilität entsprechende Konsequenzen nach sich zieht. Diese beziehen sich einerseits auf die steigenden Kosten für die Nutzung und andererseits auf die Auswirkungen in Form von steigender Verschmutzung, Treibhausgasemission, Staus, Lärmbelastung und nicht zuletzt dem steigenden Platzbedarf für die notwendige Infrastruktur.

Die Nebeneffekte der Mobilität verursachen allerdings auch externe Kosten, die sowohl von einzelnen Individuen, als auch Bevölkerungsgruppen oder ganzen Gesellschaften getragen werden müssen. Neben den zuvor erwähnten, negativen Effekten und den damit verbundenen Kosten existieren aber auch positive Aspekte, wie die Erschließung neuer Gebiete durch die Anbindung an bestehende Verkehrsnetze und die damit verbundenen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wachstumschancen. Diese basieren unter anderem auf den Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt, die Herstellung und den Verkauf von Fahrzeugen, die Produktion von

Treibstoff, die Ausgaben für die Nutzung und Bereitstellung von Transportdienstleistungen und der Infrastruktur. Weitere Aspekte sind die mit der Mobilität verbundenen Arbeitsplätze und die Steigerung der Produktivität durch effiziente Transportdienstleistungen. Der Beitrag am wirtschaftlichen Wachstum basiert daher auf einer zuverlässigen, sicheren, effizienten und kostengünstigen Mobilität.

Das Wachstum und die damit verbundene Wettbewerbsfähigkeit haben wiederum einen entsprechenden Einfluss auf die Umwelt und somit Auswirkungen auf die Lebensqualität. So kann die durch den Transport verursachte Luftverschmutzung so stark sein, dass Menschen gewohnte Tätigkeiten nicht mehr uneingeschränkt ausführen können. Eine andauernde Überlastung der Verkehrsinfrastruktur führt zu höheren Treibstoffkosten für den einzelnen Verkehrsteilnehmer und damit auch zu einem Anstieg der Transportkosten für Waren und Dienstleistungen. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist der erhöhte Zeitaufwand, der sich in längeren Fahrzeiten niederschlägt und somit Auswirkungen auf die volkswirtschaftliche Produktivität hat.

Wie zuvor geschildert, wirkt sich eine effiziente und flexible Mobilität positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit aus, hat aber im Gegenzug überlastete Straßen- und Verkehrsnetze zur Folge und damit wiederum einen negativen Einfluss auf die Umwelt. Das eigene Auto kann zur Erhöhung der persönlichen Lebensqualität beitragen, aber bei vielen Menschen auf engem Raum kann es durch Lärm, Luftverschmutzung und den Platzbedarf auch einen gegenteiligen Effekt erzielen. Eine effizientere Nutzung, beispielsweise durch den bestehenden öffentlichen Nahverkehr, entlastet die Umwelt und wirkt sich aber gleichzeitig negativ auf die Flexibilität sowie die damit verbundene Lebensqualität aus. In [4] wird ebenfalls argumentiert, dass Verkehrsprobleme und Stau die Effizienz der Wirtschaft untergraben, da hierdurch die städtische Umgebung verschmutzt wird und die Stadt oft an Lebensqualität verliert.

Basierend auf den genannten Überlegungen und den beschriebenen Wechselwirkungen zwischen den genannten Herausforderungen resultiert deren schwierige Vereinbarkeit, so dass in der Regel Kompromisse bezüglich der Priorisierung eingegangen werden müssen. Die genannten Herausforderungen im Zusammenhang mit der Mobilität haben dabei entsprechende Auswirkungen für die beteiligten Akteure. Aus diesem Grund werden im nächsten Abschnitt die wesentlichen Akteure identifiziert und deren Aufgaben und Interessen genauer beschrieben. Im Anschluss werden die eigentlichen Anforderungen an die Mobilität in Megastädten, die sich aus den Herausforderungen ableiten lassen, aus der Perspektive der jeweiligen Akteure vorgestellt.

2.3 Aufgaben und Anforderungen der Akteure

Auf Grund der beschriebenen Wechselwirkungen im Zusammenhang mit den maßgeblichen Herausforderungen ermöglicht eine differenziertere Betrachtung der beteiligten Akteure einen tieferen Einblick in deren Bedürfnisse. Daher werden in den folgenden Abschnitten zunächst die wesentlichen Akteure bezüglich der Mobilität in Megastädten identifiziert und deren Aufgaben beschrieben. Anschließend werden basierend auf den zuvor genannten Herausforderungen die Anforderungen diskutiert und mit den Akteuren in Zusammenhang gebracht.

2.3.1 Akteure für Mobilität in Megastädten

Eine Megastadt kann zunächst als komplexes System verstanden werden, bei dem verschiedene Verwaltungsorganisationen für die unterschiedlichen Bereiche, wie Soziales, Wirtschaft, Kultur, Bau, Verkehr oder Finanzen, zuständig sind. Dabei sind die Organisationsstrukturen sehr komplex und die Unterschiede bezüglich der Bezeichnung und Zuständigkeit der jeweiligen Verwaltungseinheiten global nicht einheitlich. Im Folgenden werden beispielhaft die Verwaltungs- und Organisationseinheiten in Form von Referaten der Stadt München aufgeführt, die im direkten Zusammenhang mit der Mobilität bzw. dem Verkehr stehen [247]:

- Das Baureferat beinhaltet die Abteilung für Hoch- und Tiefbau, wobei erstere für städtische Gebäude und Telekommunikation zuständig ist, wohingegen die Abteilung Tiefbau für den Straßenbau, dessen Unterhalt, Reinigung und technische Ausstattung verantwortlich ist.
- Das Referat für Umwelt und Gesundheit beschäftigt sich unter anderem mit dem Umweltschutz und dem Immissionsschutz. Letzterer ist in Deutschland beispielsweise für die Erfassung von Luftschadstoffen und Lärm zuständig.
- Das Kreisverwaltungsreferat unterhält eine Hauptabteilung für Straßenverkehr, die unter anderem für die kommunale Verkehrsüberwachung und die Lichtsignalanlagen zuständig ist.
- Das Referat für Stadtplanung und Bauordnung beinhaltet die Hauptabteilung für die Stadtentwicklungsplanung, die wiederum die Verkehrs- und Flächennutzungsplanung mit einschließt.

Im Hinblick auf die Verwaltung einer Stadt stellt die Politik, die auf einer übergeordneten Ebene agiert und für die Schaffung der nationalen Rahmenbedingungen und die Förderungen von Maßnahmen zur Verbesserung der Mobilität zuständig ist, ebenfalls einen wichtigen Akteur dar.

Abstrakt betrachtet ist die Stadt bzw. deren Verwaltungsapparat für die verkehrsbezogene Infrastruktur zuständig und beinhaltet deren Planung, Überwachung, Instandhaltung und gegebenenfalls die Steuerung. Die Verkehrsinfrastruktur besteht dabei aus dem Straßen- und Wegenetz zusammen mit den zugehörigen Komponenten wie Lichtsignalanlagen, Verkehrsrechnern und anderen Steuergeräten sowie aus vorhandenen Anforderungs- oder Messschleifen und statischen Sensoren zur Erfassung der aktuellen Verkehrs- oder Umweltsituation. In der Regel erfolgt die Überwachung und Steuerung dieser Komponenten über sogenannte Verkehrsleitzentralen, die im Fall von München dem entsprechenden Referat zugeordnet sind. Neben der reinen Verkehrsinfrastruktur sind in diesem Zusammenhang allerdings auch Informationen über Planung und Umsetzung von Instandhaltungs-, Ausbau- oder Neubauarbeiten, die den Verkehr betreffen und zu Behinderungen oder Einschränkungen führen können, relevant. Ein weiterer Aspekt ist der Gesundheits- bzw. Umweltschutz für den beispielsweise verkehrsberuhigende Maßnahmen und Konzepte umgesetzt werden, wie durch die Einführung von Umweltzonen oder einer Stadtmaut. Im Rahmen dieser Arbeit wird der gesamte Verwaltungsapparat einer Stadt abstrakt betrachtet und durch einen einzigen Akteur repräsentiert, der im Folgenden Administration genannt wird. In naher Zukunft wird auch die Integration von Stromanbietern und

der entsprechenden Infrastruktur eine wesentliche Rolle im Zuge der aufstrebenden Elektromobilität spielen. Allerdings wird das Teilgebiet der Elektromobilität im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft, sondern soll an dieser Stelle nur informell erwähnt werden.

Der Bereich der Mobilität umfasst je nach Literatur unterschiedliche Akteure. In dem EU Projekt CVIS [195], bei dem es um die Fahrzeugkommunikation und deren Möglichkeiten zur Verbesserung im Verkehrsmanagement mit Hilfe eines Frameworks zur Unterstützung kooperativer Anwendungen geht, werden diese zunächst in die Gruppen Nutzer, Hersteller und Entwickler sowie Förderer kooperativer Systeme unterteilt. Die dort genannten Akteure beziehen sich allerdings primär auf die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Unterstützung kooperativer Systeme und nur im geringen Maße auf die potentielle bzw. realisierte Mobilität.

In [159] werden Akteure zur Umsetzung von Maßnahmen des Verkehrsmanagements genannt und bieten daher eine umfassendere Betrachtung mit direktem Bezug zur Mobilität. Im Rahmen der Förderinitiative Mobilität 21 [30] wurde die Liste der Akteure noch um Wissenschaft und Verbände erweitert. Die folgende Aufzählung der an der Mobilität beteiligten Akteure beschreibt kurz die jeweiligen Aufgaben:

1. Politik und Behörden in Form von Organisationseinheiten oder Gebietskörperschaften, wie Bund, Länder, Landkreise und Gemeinden sind verantwortlich für die Erstellung, Überprüfung und Umsetzung von Regeln und Rahmenbedingungen für Mobilität. Dadurch haben sie die Möglichkeit richtungsweisende Anreize und Chancen für die Betreiber zur Umsetzung zu schaffen. Sie sind daher vergleichbar mit der zuvor genannten Administration und werden im weiteren Verlauf mit dieser gleich gesetzt.
2. Die Betreiber von öffentlichen oder privaten Verkehrsangeboten bieten technologische und praktische Lösungen an, um die Mobilitätsbedürfnisse zu decken. Zu diesem Zweck stellen sie unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen Transportangebote und damit verbundene Dienstleistungen zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Bedürfnisse haben sie die Möglichkeit, die praktische Umsetzung von Mobilität zu beeinflussen. In diesem Zusammenhang richtet sich der Fokus öffentlicher Organisationen auf das Allgemeinwohl, wohingegen bei privaten Betreiberorganisationen der einzelne Verkehrsteilnehmer im Vordergrund steht.
3. Nutzer treten in der Regel als einzelne Individuen auf, die einen Bedarf an Transportangeboten und entsprechenden Dienstleistungen haben. Als Kunde und Benutzer von Mobilitätsangeboten spielen sie die Schlüsselrolle und sind durch ihr Verhalten gleichzeitig ein wesentlicher Indikator für den Erfolg oder Misserfolg von Mobilitätskonzepten. Zusätzlich kann in diesem Zusammenhang bezüglich der Art des Mobilitätsbedarfs (Arbeit, Freizeit, Konsum) unterschieden werden.
4. Die Wissenschaft und Verbände befassen sich mit der Erforschung und Analyse zukünftiger oder auch bestehender Mobilitätsansätze und können basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und aus der jeweiligen Perspektive Einfluss auf politische Entscheidungen ausüben und als beratende Organisationen fungieren.
5. Die Industrie, bestehend aus den Bereichen Automobil und Automobilzubehör, Eisenbahntechnik, Telematik und Informationstechnik, stellt im Wesentlichen Fahrzeuge und

Infrastrukturkomponenten zusammen mit den notwendigen Technologien zur Verfügung. Die Fahrzeuge werden von den Mobilitätsanbietern oder Benutzern verwendet, um den Mobilitätsbedarf bzw. die Nachfrage zu decken.

Neben den bereits genannten Akteuren, existiert noch eine Reihe weiterer Akteure, die indirekt mit dem Verkehr bzw. der Mobilität in Verbindung stehen. Bezugnehmend auf den Austausch von Informationen ist insbesondere die Kommunikation zu nennen, wobei über eine entsprechende Infrastruktur verkehrsrelevante Daten bereitgestellt, übermittelt und verarbeitet werden können. Diesbezüglich tragen hauptsächlich privatwirtschaftliche Telekommunikationsunternehmen zum Ausbau der notwendigen Infrastruktur bei und sind für deren Finanzierung, Instandhaltung und Erweiterung verantwortlich. Auch im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug (englisch: Car-to-Car, C2C oder Vehicle-to-Vehicle, V2V) bzw. der Fahrzeug-zu-Infrastruktur (englisch: Car-to-Infrastruktur, C2I bzw. V2I) Kommunikation, auf die in Abschnitt 4.1.1.2 genauer eingegangen wird, können von der Industrie entsprechende Technologien in Form von Zubehör, Telematiksystemen und Informationstechnik zur Verfügung gestellt werden. Parallel zu diesen Kommunikationsmöglichkeiten existieren auch interne Kommunikationsinfrastrukturen, wie beispielsweise sogenannte Bündelfunk- oder Betriebsfunksysteme, die direkt von den jeweiligen Mobilitätsanbietern aufgebaut, verwaltet und erweitert werden. Kommunikationsnetze sind eine Grundlage für den Informations- und Datenaustausch und liefern damit einen wichtigen Baustein für die kooperative Mobilität. Neben der mobilen Kommunikation muss allerdings auch eine Anbindung an stationäre Komponenten, wie beispielsweise an eine Verkehrsleitzentrale, gewährleistet sein, was zu einer besseren Vernetzung der Akteure untereinander führt. Die übrigen Handlungsfelder des Mobilitätsmanagements beziehen sich auf die domänenübergreifende Information, Koordination und Vermarktungstechnik und bauen daher auf einer funktionierenden Kommunikationsinfrastruktur auf. Insbesondere die mobile Kommunikation und das mobile Internet haben zusammen mit der vermehrten Verbreitung und Nutzung von Smartphones dazu beigetragen, dass auch für den Benutzer beliebige Informationen an jedem Ort verfügbar wurden. Hierbei können entsprechende Geräte auf Grund der zahlreichen Möglichkeiten sehr flexibel eingesetzt werden, wodurch sich auch für die Verkehrsdomäne neue Chancen und Potenziale ergeben.

Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei der genannten Akteure wesentlich: Auf der einen Seite handelt es sich um Mobilitätsanbieter, die versuchen mit entsprechenden Dienstleistungen und Angeboten den Bedarf zu decken und den Transport durchzuführen. Auf der anderen Seite die Benutzer von Mobilität, die unter anderem Information über die Mobilitätsmöglichkeiten nutzen und Dienste oder Angebote wahrnehmen, die eine tatsächliche Ortsveränderung ermöglichen.

Durch eine abstraktere Betrachtung des Systems Megastadt werden die zuvor genannten Akteure einschließlich ihrer Aufgaben mit dem Begriff Administration zusammengefasst. Dieser Akteur repräsentiert dabei gleichzeitig die politischen und ausführenden Organisationseinheiten mit Bezug zur Mobilität. Einerseits werden dafür entsprechende Rahmenbedingungen festgelegt und überwacht und andererseits tritt dieser Akteur als Infrastrukturbetreiber auf und ist für die damit verbundenen Aufgaben zuständig. Aus dem Bereich der Mobilität lassen sich zwei weitere Akteure ableiten: die Mobilitätsdienstleister oder Mobilitätsanbieter und die eigentlichen Mobilitätsnutzer oder Benutzer von Mobilität. Die drei genannten Hauptakteure stehen

bei der Entwicklung von Konzepten im Zusammenhang mit der Mobilität im Vordergrund und sind daher entsprechend zu berücksichtigen. Die Abhängigkeiten der genannten Hauptakteure und deren Bezug zur Mobilität und den grundlegenden Herausforderungen sind in Abbildung 2.2 illustriert. In diesem Zusammenhang wird von einem Grundbedürfnis der Benutzer nach

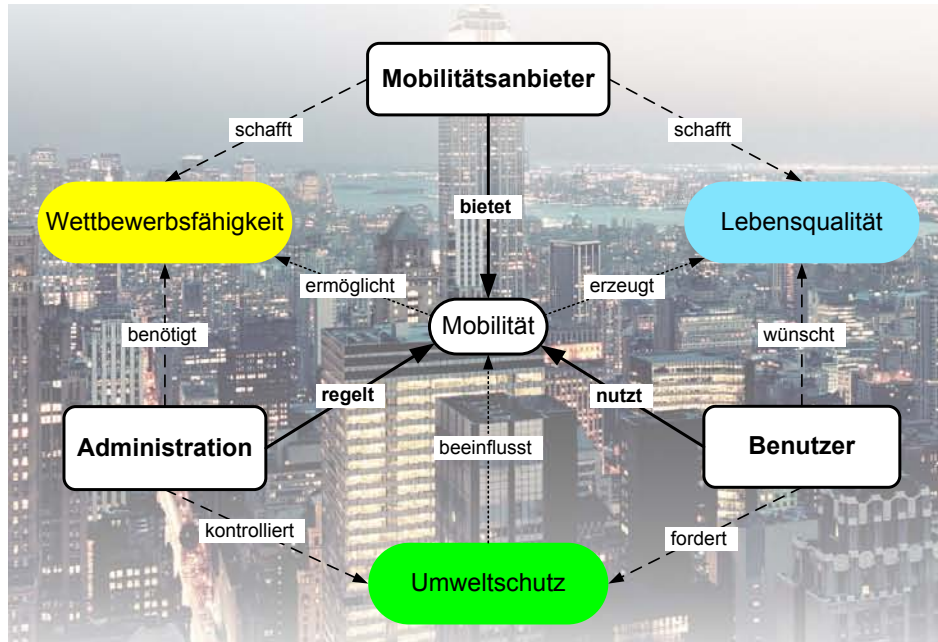


Abbildung 2.2: Akteure und Abhängigkeiten bezüglich Mobilität und Herausforderungen

individueller und flexibler Mobilität ausgegangen, wodurch ihnen die Möglichkeit gegeben wird, unterschiedliche Aktivitäten auszuüben, die primär zum Erhalt oder zur Steigerung der Lebensqualität genutzt werden. Dabei stellen die Mobilitätsdienstleister entsprechende Informationen und Angebote zur Verfügung, um die Nachfrage zu decken, wobei die effiziente und attraktive Nutzung im Vordergrund steht und die Wettbewerbsfähigkeit nach Möglichkeit gesteigert werden soll. Unter Berücksichtigung dieser beiden Akteure fungiert die Administration als verwaltende, organisierende und überwachende Entität und befasst sich so zu sagen mit dem Kontext, in dem die Mobilität stattfindet. Dabei hat sie ein Interesse an einer hohen Wettbewerbsfähigkeit, wobei die Auswirkungen auf die Umwelt minimiert werden sollen. Diese beiden Aspekte haben jedoch wiederum einen erheblichen Einfluss auf die Lebensqualität. Die Schwierigkeit besteht darin, einerseits einen Kompromiss bezüglich der Gewichtung der grundlegenden Herausforderungen zu finden und andererseits zwischen den Interessen und Anforderungen der wesentlichen Akteure, die im nächsten Abschnitt behandelt werden, abzuwägen.

2.3.2 Grundlegende Anforderungen für Mobilität in Megastädten

Unter Berücksichtigung der Herausforderungen in Form der Lebensqualität, der Wettbewerbsfähigkeit und der Umwelt werden zunächst die allgemeinen, nicht funktionalen Anforderungen für die zuvor identifizierten Akteure abgeleitet. In diesem Zusammenhang geben die 12 Indikatoren aus dem Projekt für nachhaltige Mobilität 2030 [304] einen guten Überblick und dienen daher als Orientierung.

Aus Sicht der Benutzer ist die Zugänglichkeit von Mobilitätsangeboten ein entscheidender Faktor und kann mit der Zuverlässigkeit und der Flexibilität unter dem Aspekt der Bequemlichkeit zusammengefasst werden. Bezüglich der Verkehrsmittelwahl, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Bequemlichkeit hat, kann noch zwischen dem Besitz eines eigenen Fahrzeugs und der Erreichbarkeit bzw. der Entfernung zu Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrsnetzes unterschieden werden. Weitere Punkte, die unter den Aspekt der Zugänglichkeit fallen, sind Barrierefreiheit und altersgerechte Angebote. Neben dem zeitlichen Aufwand bezüglich der Zugänglichkeit spielt aber auch der Zeitaufwand in Form der Reisezeit eine entscheidende Rolle. Dieser bezieht sich wie auch die Zuverlässigkeit oder der Reisekomfort auf die Dienstqualität, wobei in der Regel ein Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen getroffen werden muss, der sich wiederum in der Wahl des Verkehrsmittels niederschlägt. Unter Kosten werden beispielsweise der Preis einer Fahrkarte, anfallende Maut- und Nutzungsgebühren sowie Park- oder auch Benzinkosten verstanden. Weitere Faktoren aus Sicht der Benutzer betreffen die persönliche Sicherheit und das Umweltbewusstsein. Bezüglich der Verkehrsmittelwahl haben in [320] zusammengefasste Studien ergeben, dass die Bequemlichkeit und der Zeitaufwand für die Reise oder die Mobilität eine größere Rolle spielen als die Transportkosten und das Umweltbewusstsein des Benutzers. Informationen und Angebote bezüglich der Reiseplanung sowohl im Vorfeld als auch während der Durchführung der Reise werden als hilfreich erachtet und unterstützen den Benutzer in seiner persönlichen Mobilität. Damit beziehen sich diese Aspekte vordergründig auf die Lebensqualität, wobei der Einfluss auf die Umwelt eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Bei den Mobilitätsanbietern muss auf Grund der Ausrichtung zunächst zwischen den öffentlichen und privaten Betreiberorganisationen unterschieden werden. Während die öffentlichen Anbieter am Gemeinwohl und daher an einer möglichst großen Abdeckung interessiert sind, haben private Unternehmen ein größeres Interesse an der Wirtschaftlichkeit und damit an der Rentabilität der zur Verfügung gestellten Mobilität. Die Verfügbarkeit ist daher für öffentliche Betreiber essentiell, wobei auch private Unternehmen ein großes Interesse daran haben, die entsprechenden Mobilitätsdienstleistungen einer möglichst großen Anzahl von Personen zur Verfügung zu stellen. Hierbei spielt unter anderem die Attraktivität der Angebote eine entscheidende Rolle. Eine Möglichkeit, die Attraktivität zu steigern ist eine verstärkte Orientierung an den Bedürfnissen und Anforderungen der Kunden. Hierfür sind auch die zuvor aus der Perspektive der Benutzer genannten Aspekte, wie Erreichbarkeit, Zuverlässigkeit oder Kosten relevant. In diesem Zusammenhang ist auch die Sicherheit wesentlich, bei der zwischen der Sicherheit der einzelnen Personen und der Systemsicherheit bezüglich möglicher Zwischenfälle unterschieden werden kann. Zusammenfassen lassen sich die genannten Punkte unter dem Begriff der Dienstqualität. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit sind insbesondere die Betriebskosten zu nennen, die auch die Personalkosten, die Fahrzeug- und Wartungskosten mit einschließen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Kosten ist die effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen und kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Auslastung, eine bessere Planung oder die Anschaffung effizienterer Fahrzeuge erreicht werden. Allerdings können entsprechende Maßnahmen auch Auswirkungen auf die Dienstqualität, die Verfügbarkeit und damit wiederum

auf die Rentabilität des Mobilitätsanbieters haben. Im Gegensatz zu den Benutzern steht bei den Mobilitätsanbietern die Wirtschaftlichkeit und somit die Wettbewerbsfähigkeit im Vordergrund, die gleichzeitig zu einer Verbesserung der Lebensqualität führen kann.

Die Administration von Megastädten soll die Rahmenbedingungen schaffen und gegebenenfalls Maßnahmen durchführen oder überwachen, die im Zusammenhang mit der Mobilität stehen. In den letzten Jahren hat der Umweltaspekt immer mehr an Bedeutung gewonnen und manifestiert sich daher auch in der Bevölkerung. Die Europäische Union hat sich verpflichtet den Ausstoß von CO_2 bis zum Jahr 2020 um 20% im Vergleich zum Jahr 1990 zu reduzieren und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Nach Angaben des Bundesumweltamtes verursachte der Straßenverkehr 19,5% des Gesamtausstoßes im Jahr 2009 in Deutschland [313]. Weltweit beträgt der Anteil nach den Daten der Internationalen Energiebehörde (englisch: International Energy Agency, IEA) [118] 22,5%. Basierend auf Prognosen wird sich der verkehrsbedingte Ausstoß von CO_2 Emissionen weltweit bis zum Jahr 2050 verdoppeln [304]. Daher ist eine Reduzierung der verkehrsbedingten Schadstoffe sowohl für die Umwelt als auch für die Lebensqualität der Bewohner entscheidend. Eine Möglichkeit bezieht sich auf die allgemeine Verkehrsreduzierung, die beispielsweise durch städtische Mautgebühren oder sogenannte Umweltzonen erreicht werden kann, wobei auch der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit im Zusammenhang mit den zusätzlichen Mobilitätskosten zu berücksichtigen ist. Damit entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden können, sind umfangreiche Informationen über die aktuelle Situation zum Erkennen von Problemen und als Planungsgrundlage entscheidend, wobei basierend auf diesen Informationen auch der Nutzen evaluiert werden kann. Weitere Aspekte beziehen sich auf das Wachstum und die Größe von Megastädten. Nachdem insbesondere im asiatischen Raum die Städte schneller als die Verkehrsinfrastruktur wachsen, müssen geeignete Konzepte bezüglich der Mobilität schnell umsetzbar und entsprechend skalierbar sein. Erschwerend kommt die begrenzte Verfügbarkeit an Verkehrsfläche hinzu, die für den Ausbau einer geeigneten Infrastruktur notwendig ist. Daher konzentrieren sich nachhaltige Ansätze und Maßnahmen vorrangig an einer besseren und effizienteren Nutzung der vorhandenen Ressourcen. Die genannten Aspekte beziehen sich insbesondere auf die Konsequenzen für die Umwelt, wobei in diesem Zusammenhang auch die Lebensqualität und die Wettbewerbsfähigkeit berücksichtigt werden müssen.

Die für die drei Akteure aufgeführten Anforderungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst, wobei diese keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit hat und je nach Betrachtungsweise entsprechend erweitert werden kann. In diesem Abschnitt wurden die wesentlichen Akteure, die bei der Entwicklung von Mobilitätskonzepten zu berücksichtigen sind, sowie deren Aufgaben und Anforderungen vorgestellt. Der folgende Abschnitt befasst sich mit geeigneten Maßnahmen, die aus Sicht der Verkehrsforschung einen Beitrag leisten können, den Herausforderungen unter Berücksichtigung der Anforderungen zu begegnen. Bei diesen Maßnahmen handelt es sich vorrangig um Mobilitätsanwendungen und -dienstleistungen die zunächst klassifiziert werden.

Anforderung	Kurzbeschreibung
Benutzer	
Bequemlichkeit	Die Bequemlichkeit bezieht sich auf Aspekte, die der Erhöhung des Komforts dienen, wie die Zugänglichkeit des Verkehrsmittels oder die Flexibilität bezüglich der Nutzung.
Dienstqualität	Eine hohe Qualität zeichnet sich beispielsweise durch eine geringe Reisezeit, wenige Fahrzeugwechsel oder die Verfügbarkeit aus.
Kosten	Die für den Benutzer aufzuwendenden Mittel sind möglichst gering zu halten, wobei ein Kompromiss bezüglich der Qualität oder der Bequemlichkeit in Kauf genommen werden muss.
Umwelt	Unter Berücksichtigung des entstehenden Umweltbewusstseins bei den Mobilitätsnutzern müssen die ökologischen Auswirkungen reduziert werden.
Information	Zur Planung vor Reiseantritt und auch während der Reise über die gesamte Bandbreite der Mobilität.
Mobilitätsanbieter	
Wirtschaftlichkeit	Unabhängig von öffentlichen oder privaten Mobilitätsdienstleistern dürfen die Einnahmen durch das Angebot nicht über den dafür notwendigen Kosten liegen.
Verfügbarkeit	Durch Mobilitätsangebote wird ein möglichst großes Gebiet ohne zeitliche Beschränkungen abgedeckt. Ein weiterer Aspekt ist die Ausfallsicherheit von entsprechenden Angeboten oder Systemen.
Attraktivität	Um eine breite Masse der Bevölkerung anzusprechen, die die jeweiligen Mobilitätsangebote nutzen, müssen Maßnahmen getroffen werden, die zu einer Erhöhung der Attraktivität führen. Dies kann sich auf die Kosten, die Verfügbarkeit oder den Komfort des Angebots beziehen und entspricht damit der Dienstqualität.
Sicherheit	Einerseits sollte die Sicherheit der Nutzer gewährleistet sein, so dass kein Schaden für Personen (oder Waren) entsteht und andererseits sollte auch das Verkehrssystem als solches nach Möglichkeit störungsfrei funktionieren.
Effizienz	Dieser Aspekt bezieht sich einerseits auf die Fahrzeughersteller, die für die Entwicklung und Produktion effizienterer Verkehrsmittel verantwortlich sind und andererseits auf eine bessere Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen, wobei hierbei die Planung und das Management von Mobilitätsdienstleistungen im Vordergrund stehen.
Administration	
Umwelt	Im Gegensatz zum Benutzer steht hierbei die Einhaltung der vereinbarten und Regelung neuer Umweltziele, wie deren Kontrolle im Vordergrund und bezieht sich damit auf die Herausforderungen bezüglich Lebensqualität und Wettbewerbsfähigkeit.
Skalierbarkeit	Im Zusammenhang mit Megastädten müssen entsprechende Maßnahmen oder Systeme bezüglich der Verkehrsplanung und des Verkehrsmanagements skalierbar sein.
Effizienz	Die Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur kollektiven Verkehrsbeeinussung, z.B. durch Verkehrsleitsysteme sowie die Überwachung des städtischen Verkehrssystems soll kostengünstig und performant realisiert werden.

Tabelle 2.1: Ausprägungen von Anforderungen der wesentlichen Akteure

2.4 Klassifikation von Mobilitätsanwendungen und -dienstleistungen

In den letzten Abschnitten wurde zunächst allgemein von Maßnahmen gesprochen, wie die wesentlichen Herausforderungen aus Abschnitt 2.2 im Zusammenhang mit Mobilität bewältigt werden können. Im Bereich der Verkehrsforschung existieren hierzu Ansätze auf unterschiedlichen Ebenen, die häufig mit dem Begriff Verkehrstelematik zusammengefasst und im Folgenden genauer betrachtet und klassifiziert werden. Die Verkehrstelematik ist dabei nicht als eine Technologie zu verstehen, sondern vielmehr als ein Aufgabenbereich in dem Informations- und Telekommunikationssysteme für die Verkehrsprozessabwicklung verwendet werden [5]. Die englische Bezeichnung für Verkehrstelematik lautet *Intelligent Transport Systems* (ITS), wobei in der Literatur auch die Bezeichnung Intelligent Transportation Systems oder die

deutsche Übersetzung Intelligente Transportsysteme (ITS) bzw. Intelligente Verkehrssysteme (IVS) synonym verwendet werden.

2.4.1 Intelligente Transportsysteme

Bereits im Jahr 1986 wurde über die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) im Verkehrsbereich diskutiert [302]. Dies waren gleichzeitig die Anfänge von ITS, wobei es sich um Systeme handelt, die für die Entwicklung und Verbesserung von Verkehrssystemen aller Art synergetische Technologien und Systeme sowie entsprechende technische Konzepte einsetzen. ITS befassen sich mit der kooperativen Vernetzung der Verkehrsteilnehmer, der Vernetzung der Verkehrsmittel mit der Infrastruktur und der verkehrsmittelübergreifenden Vernetzung. Mit Hilfe dieser Vernetzung und des dadurch möglichen Informationsaustausches können diverse Daten über den Straßenzustand, die Verkehrssituation, die Wetterlage und die Position übermittelt, gesammelt und verarbeitet werden. Anschließend können diese Daten genutzt werden, um zu einer sicheren und effektiven Gestaltung des Straßenverkehrs, zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und zur Erweiterung der Informationsbasis für alle Verkehrsteilnehmer beizutragen.

Am 7. Juli 2010 verabschiedete das Europäische Parlament eine Richtlinie zur Einführung von ITS, wonach es sich um hochentwickelte Anwendungen handelt, die - ohne Intelligenz an sich zu beinhalten - darauf abzielen, innovative Dienste im Bereich verschiedener Verkehrsträger und des Verkehrsmanagements anzubieten sowie die verschiedenen Nutzer mit umfassenden Informationen zu versorgen und sie dadurch in die Lage zu versetzen, die Verkehrsnetze auf sichere, koordinierte und „klügere“ Weise zu nutzen [74]. In dieser Richtlinie sind auch die vier vorrangigen Bereiche von ITS festgehalten:

1. Optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reiseinformationen
2. Kontinuität der ITS Dienste in den Bereichen Verkehrs- und Frachtmanagement
3. ITS Anwendungen zur Erleichterung der Straßenverkehrssicherheit
4. Verbindung zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur

Diesbezüglich ist in Tabelle 2.2 eine breite Palette an Methoden und Anwendungen für ITS aufgeführt. Dabei kann allerdings nicht eine einzige Anwendung als Ansatz für eine ganzheitliche Lösung gesehen werden, sondern die Verkehrsplaner müssen abhängig von den jeweiligen Gegebenheiten und Problemen unterschiedliche Maßnahmen umsetzen, um den zuvor genannten Herausforderungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen zu begegnen.

Bezüglich der Dienste für die Benutzer von ITS wurde zusätzlich eine ausführlichere Taxonomie aus insgesamt 11 Bereichen und 43 Diensten zusammengestellt, die in Tabelle 2.3 dargestellt sind und eine differenziertere und anwendungsorientiertere Betrachtung von ITS ermöglichen. Zuletzt konzentrierte sich die Forschung im Bereich intelligenter Fahrzeuge insbesondere auf sogenannte kooperative ITS, bei denen die Fahrzeuge untereinander und oder mit der Infrastruktur kommunizieren, um dadurch die Zuverlässigkeit und Qualität von Informationen über die Fahrzeuge, deren Positionen und die Verkehrssituation zu verbessern. Nach dem Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (englisch: European Telecommunications Standards Institute, ETSI) [75] wird die Kooperation zu

Bereich	ITS Methoden und Anwendungen	
Verkehrsmanagement	Städtische Verkehrskontrolle, Kreuzungskontrolle, Autobahnmanagement, Zuussregelung, dynamische Geschwindigkeitsanpassung, Zugangskontrolle	Parkraummanagement, Störungsmanagement, Einrichtungen für verwundbare Verkehrsteilnehmer, Überwachungsmanagement, Durchsetzung der Verkehrsordnung, Umweltverkehrsmanagement
Verkehrs- und Reiseinformationen	Informationen bzgl. des öffentlichen Verkehrs, Verkehrsinformationen	Pre-Trip Reiseplanung, Routenführung und Navigation
Integrierte Bezahlungssysteme	Bezahlungssysteme für den öffentlichen Verkehr, Parkplatzbezahlungssysteme	Stadt Maut, Straßennutzungsgebühren
Kollektives Transportmanagement	Flotten- und Ressourcenmanagement, Priorisierung des öffentlichen Verkehrs	Gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen, Fahrgemeinschaften, Taxi Management, bedarfsorientierter Transport
Fracht- und Gütertransportmanagement	Gefahrguttransport, Flottenmanagement	Frachtmanagement, koordinierte Stadtlogistik
Sicherheits- und Notfallmanagement	Rettungsdienste, Störungsmanagement, Betriebsstörungen- und Notfalldienste	Sicherheit im öffentlichen Verkehr

Tabelle 2.2: Methoden und Anwendungen von ITS nach [7]

einer Verbesserung existierender und zu einer Entwicklung neuer Anwendungen führen, die somit maßgeblich zur Erhöhung der Transporteffizienz sowie der Sicherheit beiträgt. Diesbezüglich wurden im Rahmen einiger Projekte die Aspekte der einzelnen Bereiche untersucht. Der nächste Abschnitt soll anhand einiger Projekte einen kurzen Einblick über die Forschungsschwerpunkte in den letzten Jahren geben.

2.4.2 Projekte im Zusammenhang mit ITS

Mittlerweile existieren zahlreiche Projekte im Zusammenhang mit ITS, die sich mit unterschiedlichen Aspekten der zuvor aufgeführten Bereiche auseinandersetzen. Mit den notwendigen Grundlagen befasst sich seit 2002 das industriegetriebene Car2Car Communication Consortium (C2C-CC) [189]. Im Vordergrund stehen hierbei insbesondere die Fahrzeugkommunikation (C2C) sowie die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur (C2I) mit dem wesentlichen Ziel die Verkehrssicherheit zu verbessern. Das Konsortium beschäftigt sich in diesem Zusammenhang auch mit der Harmonisierung von Forschungsergebnissen und der Etablierung europäischer Standards für C2C bzw. C2I Kommunikationssysteme. Dabei erfolgt die Standardisierung in enger Zusammenarbeit mit dem ETSI, dem Europäischen Komitee für Normung (englisch: European Committee for Standardisation, CEN) und den Wirtschaftsregionen USA und Japan. Anhand von Feldversuchen in begleitenden Projekten, wie *Sichere und Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland* (simTD) [245] und *DRIVE C2X* [200] werden die entwickelten Standards untersucht und validiert. Mit der Kommunikation beschäftigte sich unter anderem auch das Projekt *CoCAR* bzw. *CoCARX* [82], wobei die Verwendung zellulärer Mobilfunktechnologien im Vordergrund standen. Diese Möglichkeit zur Kommunikation wird allerdings auch als Teilbereich der Fahrzeugvernetzung im Rahmen der C2C berücksichtigt und vom entsprechenden Konsortium mit C2X Kommunikation bezeichnet.

Der Schwerpunkt einer Vielzahl von Projekten, wie *HeERO* [213], *WATCH-OVER* [258], *SAFESPOT* [243] und *COOPERS* [197], bezieht sich hauptsächlich auf Aspekte der

Bereich	Nummer	Dienste
Reiseinformationen	1.1.	Pre-Trip Informationen
	1.2.	On-Trip Informationen
	1.3.	Reiseinformationsdienste
	1.4.	Routenführung und Navigation Pre-Trip
	1.5.	Routenführung und Navigation On-Trip
	1.6.	Reiseplanungsunterstützung
Verkehrsmanagement und Betrieb	2.1.	Verkehrsmanagement und Kontrolle
	2.2.	Transportabhängiges Störungsmanagement
	2.3.	Bedarfsmanagement
	2.4.	Wartungsmanagement der Transportinfrastruktur
	2.5.	Überwachung und Durchsetzung
Fahrzeugdienste - Fahrerassistenz und Fahrzeugkontrolle	3.1.	Sichtverbesserung
	3.2.	Selbstfahrende Fahrzeuge
	3.3.	Kollisionswarnsysteme
	3.4.	Sicherheitsbereitschaftssysteme
	3.5.	Pre-Crash Systeme
Betrieb von Fracht- und gewerblichem Transport	4.1.	Vorverzollung gewerblicher Fahrzeuge
	4.2.	Administrative Vorläufe gewerblicher Fahrzeuge
	4.3.	Automatische Straßensicherheitsinspektion
	4.4.	On-board Sicherheitsüberwachung gewerblicher Fahrzeuge
	4.5.	Schwertransport Flottenmanagement
	4.6.	Intermodales Informationsmanagement
	4.7.	Management und Kontrolle von Umschlagsplätzen
	4.8.	Gefahrgutmanagement
Öffentlicher Verkehr	5.1.	Öffentliches Nahverkehrsmanagement
	5.2.	Bedarfsorientierung und gemeinsamer Transport
Rettungsdienste	6.1.	Notfallbenachrichtigung und persönliche Sicherheit
	6.2.	Finden und Bergen von Fahrzeugen
	6.3.	Einsatzfahrzeugmanagement
	6.4.	Gefahrgut und Zwischenfall Benachrichtigung
Elektronische Bezahlssysteme	7.1.	Elektronische Finanztransaktionen im Verkehr
	7.2.	Integrierte Bezahlssysteme
Persönliche Sicherheit	8.1.	Öffentliche Verkehrssicherheit
	8.2.	Sicherheitsverbesserungen für verwundbare Verkehrsteilnehmer
	8.3.	Sicherheitsverbesserungen bzgl. der Barrierefreiheit
	8.4.	Sicherheitsmaßnahmen für intelligente Ampeln und Übergänge
Überwachung von Wetter- und Umweltbedingungen	9.1.	Überwachung der Wetterbedingungen
	9.2.	Überwachung der Umweltbedingungen
Katastrophenschutzmanagement und Koordination	10.1.	Katastrophenschutz Datenverarbeitung
	10.2.	Katastrophenschutz Management
	10.3.	Koordination der Einsatzkräfte
Nationale Sicherheit	11.1.	Überwachung und Kontrolle verdächtiger Fahrzeuge
	11.2.	Überwachung kritischer Infrastruktur

Tabelle 2.3: Bereiche und Dienste für ITS Nutzer nach [7]

Sicherheit im Straßenverkehr und damit auf den 3., 6. und 8. Bereich aus Tabelle 2.3. In diesem Zusammenhang wurden unter anderem automatische Notrufsysteme, wie eCall, Kollisionswarnsysteme, Fahrerassistenzsysteme und Systeme zur Überwachung des Straßenzustandes betrachtet und entwickelt.

Im Bereich der Reiseinformationen sind Projekte wie *Viajeo* [256] bzw. *Instant Mobility* [215] zu nennen, die sich unter anderem mit proaktiven Informations- und Reiseplanungsdiensten sowie den entsprechenden Plattformen zur Informationsverbreitung beschäftigen und dem 1. ITS Bereich zuzuordnen sind. Diesbezüglich sind auch Daten über die aktuelle Verkehrssituation, die Verfügbarkeit von öffentlichen Verkehrsmitteln und anderen Mobilitätsangeboten relevant. Die zuletzt genannten Punkte werden auch für das Verkehrsmanagement verwendet und beziehen sich auf den 2. Bereich der genannten Tabelle. Dabei wird unter anderem versucht den Verkehrsszustand abhängig von der jeweiligen Auslastung und den daraus resultierenden Durchschnittsgeschwindigkeiten zu steuern und zu optimieren. Hierfür sind detaillierte Informationen über die aktuelle Verkehrssituation entscheidend, die beispielsweise in Form sogenannter Floating Car Data (FCD) zur Verfügung stehen. Das Projekt *CIVIS* [196] beschäftigte sich unter anderem auch mit der Gewinnung dieser Daten und der Berechnung des aktuellen Verkehrsszustandes sowie den Möglichkeiten der Verkehrsbeeinflussung. Neben diesen Informationen werden auch Daten von Induktionsschleifen und Kameras verwendet, um den Verkehrsszustand zu optimieren. *TRAVOLUTION* [254] verwendet genetische Algorithmen zur Lichtsignalsteuerung für das Hauptstraßennetz in Ingolstadt zur Optimierung einer bestmöglichen Grünen Welle. Die Steuerung von Lichtsignalanlagen mit Bezug zur Priorisierung einzelner Fahrzeuge wird auch im Rahmen der Projekte *FREILOT* [209] oder *eCoMove* [205] behandelt. Im städtischen Umfeld kann aber auch das Parkraummanagement dem Verkehrsmanagement zugeordnet werden, bei dem im Wesentlichen geeignete Informationen bereitgestellt werden, um den Parkplatzsuchverkehr und damit das Verkehrsaufkommen insgesamt zu reduzieren. Für das Verkehrsmanagement werden in den letzten Jahren neben Verkehrs- auch vermehrt Wetter- und Umweltdaten berücksichtigt. Mit der Erfassung und Verarbeitung von Umweltinformationen im Zusammenhang mit dem Verkehr beschäftigt sich das Projekt *Niches+* [229] und befasst sich damit überwiegend mit dem 9. Bereich der obigen Tabelle.

Ein Projekt mit Bezug zum 4. Bereich, dem Betrieb von Fracht- und gewerblichem Transport, ist das Projekt *GOOD ROUTE* [210], wobei bei der Routenplanung Parameter wie das Gefahrenpotenzial, die Wetterbedingungen, die Bevölkerungsdichte und der Straßenzustand berücksichtigt wurde, um eine optimale Route zu berechnen.

Im 2. Bereich, dem öffentlichen Verkehr, konzentrierten sich die Projekte einerseits auf multimodale Informationssysteme, die auch alternative Mobilitätsangebote einschließen. Dabei wird zwischen In-Fahrzeug Informationssystemen und externen oder mobilen Informationssystemen unterschieden. Diese Systeme haben damit auch einen direkten Bezug zu dem 1. Bereich der Tabelle, den Reiseinformationen, die unter anderem von dem Projekt *Instant Mobility* [215] abgedeckt wurden. Andererseits steht hierbei der bedarfsorientierte Transport im Vordergrund, der bisher primär für den Kurzstreckentransport gedacht war und die Lücke zwischen dem öffentlichen Verkehr und dem Individualverkehr schließen soll. Im Rahmen von *CityMobil* [193] wurden diesbezüglich einige Vorzeigeprojekte für den sogenannten Personal Rapid Transport

und Group Rapid Transport auf dezidierten Strecken realisiert.

Bezahlsysteme, die dem 7. Bereich zugeordnet werden können, befassen sich im Wesentlichen mit verkehrsrelevanten Transaktionen, die beispielsweise bei Maut- und kontaktlosen Bezahlssystemen eingesetzt werden können. Ein bereits im Betrieb befindliches System der ersten Kategorie ist *TollCollect* [251] zur Abrechnung von Autobahnnutzungsgebühren für LKWs in Deutschland. Bezüglich der zweiten Kategorie haben sich die OysterCard [253] in London oder die Octopus Card [230] in Hong Kong als kontaktlose Bezahlssysteme für den öffentlichen Verkehr und teilweise auch in kooperierenden Geschäften bewährt. Bekannt sind entsprechende Systeme auch unter dem Begriff Mobile Payment [124, 273].

Die letzten beiden Bereiche befassen sich mit der Sicherheit, wobei hier die Systemsicherheit bzw. der Schutz der Allgemeinheit im Vordergrund steht. Im Fall von Natur- oder sonstigen Katastrophen müssen auf der einen Seite den Einsatzkräften zahlreiche Informationen zur Verfügung gestellt werden und auf der anderen Seite muss die Bevölkerung über notwendige Maßnahmen informiert werden. Dabei reicht die Bandbreite von automatischen Notrufdiensten, wie eCall [203], über Priorisierung von Einsatzfahrzeugen bis hin zu Überwachungssystemen, wie dem Closed Circuit Television (CCTV) [323]. Im Wesentlichen geht es um die Minimierung der Reaktionszeiten, den Ausbau von sicherheitsrelevanten Informationssystemen und die Erhöhung der sichtbaren Sicherheitsmaßnahmen. Bezüglich der Informationssysteme sind auch Daten und Positionen von Gefahrguttransporten oder die Überprüfung und Überwachung von kritischer Infrastruktur relevant und beziehen sich damit auch auf den 4. Bereich.

Für einen ausführlichen Überblick über die Aktivitäten und den Stand der Verkehrstelematik in Europa wird auf [206] und [333] verwiesen. Im folgenden Abschnitt werden einzelne Bereiche aufgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit vertieft behandelt werden. In Kombination mit anderen, bereits existierenden Ansätzen tragen entsprechende Verbesserungen in diesen Bereichen dazu bei, die Probleme im Zusammenhang mit der Mobilität zu reduzieren. Dabei hat diese Arbeit nicht den Anspruch, die bestehenden oder zukünftigen Verkehrsprobleme vollständig zu lösen, sondern es wird mit innovativen Konzepten zum besseren Verständnis beigetragen und neue Anregungen für eine nachhaltige und flexible Mobilität in Megastädten geliefert.

2.4.3 Thematische Abgrenzung und adressierte Bereiche der Arbeit

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich vorrangig auf die vier folgenden Bereiche:

1. Reiseinformationen (1. ITS Bereich)
2. Verkehrsmanagement (2. ITS Bereich)
3. öffentlicher Verkehr (5. ITS Bereich)
4. Umweltüberwachung (9. ITS Bereich)

Dabei unterteilen sich die Informationssysteme in zwei Teilbereiche bei denen einerseits ein System für lokale, dynamische Routenführung auf mobilen Endgeräten behandelt wird und andererseits ein dezentraler Ansatz zur Unterstützung von spontanen Fahrgemeinschaften vorgestellt wird. Letzterer beschreibt dabei einen Übergang zum Bereich des öffentlichen Verkehrs in Form des gemeinsamen Transports, wobei es sich aus der Perspektive des Benutzers um ein Informationssystem handelt und aus Sicht der Mobilitätsanbieter, wie beispielsweise bei Car-Sharing Anbietern, um eine Maßnahme zur Verbesserung der

Nutzung von gemeinschaftlichen Transportangeboten. Aktuelle Systeme verwenden hierbei in der Regel zentrale Ansätze, bei denen die notwendige Funktionalität über Web-Services bereitgestellt wird. Im Bereich der öffentlichen Verkehrssysteme können Informationssysteme dazu beitragen, dass die Attraktivität und damit die Nutzung alternativer Mobilitätsangebote erhöht wird und somit zu einer Reduzierung des Individualverkehrs führt.

Im Zusammenhang mit dem Verkehrsmanagement existieren in vielen Großstädten mittlerweile sogenannte Parkleitsysteme, die die aktuelle Belegung entweder mit Hilfe digitaler Informationstafeln über Web-Services oder über in den Fahrzeugen integrierte Anwendungen zur Verfügung stellen. Dabei kann ein solches System wiederum als Informationssystem angesehen werden. Mit einem kollaborativen Parkraummanagement sollen neben den Parkhäusern zusätzlich die Parkplätze im Straßenraum berücksichtigt werden. Die Benutzer des Systems arbeiten dabei gemeinschaftlich an einer effizienten Parkraumbewirtschaftung, was zu einer Reduzierung des nicht unerheblichen Parkplatzsuchverkehrs führen kann.

Der Bereich des öffentlichen Verkehrs im Hinblick auf bedarfsorientierte Transportsysteme konzentriert sich bisher auf dezidierte Strecken zwischen sogenannten Anziehungspunkten, wie beispielsweise zwischen Großraumparkplätzen und zentralen Verkehrsknotenpunkten oder zwischen einzelnen Flughafenterminals, wie beispielsweise am Londoner Flughafen Heathrow [255]. Die hierfür eingesetzten Fahrzeuge werden angefordert und befahren in der Regel die festgelegte Strecke auf der an festgelegten Haltestellen, nach Aufforderung der Benutzer, angehalten werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit werden entsprechende Ansätze auf das bestehende Straßennetz in Ballungszentren ausgeweitet und dabei eine Kooperation zwischen den einzelnen Fahrzeugen angestrebt, um einen bedarfsorientierten und effizienten Transport von Fahrgästen zu ermöglichen. Hierbei spielen auch die Fortschritte bei selbstfahrenden Fahrzeugen im öffentlichen Verkehrsnetz [207, 310] eine wichtige Rolle. Im Hinblick auf das sogenannte Google Auto traten bereits im März 2012 in Nevada Regeln für autonome Fahrzeuge zu Testzwecken im öffentlichen Straßenverkehr in Kraft [248]. In Zukunft ist diesbezüglich auch die Verwendung entsprechender Fahrzeuge im Bereich des bedarfsorientierten Personentransports denkbar und ermöglicht einen flexiblen und vom Personal unabhängigen Einsatz, so dass entsprechende Systeme einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden können.

Bei aktuellen Ansätzen für ITS und deren Auswirkungen auf die Umwelt steht die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im Vordergrund. Der Fahrer wird hierbei von geeigneten Assistenzsystemen bei einer ökologischeren Fahrweise unterstützt, wie beispielsweise das Teilprojekt ecoDriver [204] verdeutlicht. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Informationen über das Verkehrsaufkommen und dessen Zusammensetzung werden mit Hilfe entsprechender Modelle Umweltdaten berechnet. Die tatsächlichen Messwerte spielen hierbei auf Grund des Abdeckungsgebietes eine eher untergeordnete Rolle. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit kleiner, mobiler Sensoren, die künftig in Smartphones integriert werden können, wird mit Bezug zur Umweltüberwachung ein kollaboratives System vorgestellt, das in der Lage ist hochauflösende Umweltdaten für Planungszwecke und andere umweltsensitive Anwendungen zu erfassen, zu verarbeiten und zu liefern.

Insgesamt richten sich die Reiseinformationen primär an die Benutzer von Mobilität und unterstützen diese bei der initialen Planung, der Verkehrsmittelwahl und stellen geeignete Informationen zur Verfügung. Diese ermöglichen eine flexible und individuelle Nutzung von Mobilitätsangeboten und können somit einen Beitrag zur Steigerung der Lebensqualität leisten. Im Bereich des Verkehrsmanagements zielen entsprechende Maßnahmen auf eine Verbesserung der gesamten Verkehrssituation ab und wirken sich positiv auf den innerstädtischen Verkehr aus. Hierbei richtet sich das Parkraummanagement an die Administration und ermöglicht eine effiziente Nutzung des vorhandenen Parkraumes und trägt zu einer Reduzierung des Verkehrsaufkommens bei. Dieser Effekt hängt allerdings maßgeblich von den einzelnen Verkehrsteilnehmern und deren Nutzung des Angebots ab. Die Bereitstellung entsprechender Informationen werden aus der Perspektive der Benutzer zu den Reiseinformationen gezählt. Unabhängig von der Perspektive wirkt sich eine Verbesserung des Verkehrssystems und ein leistungsfähiges Verkehrsnetz positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit und die Lebensqualität in urbanen Regionen aus. Der Bereich des öffentlichen Verkehrs richtet sich im Wesentlichen an die Mobilitätsanbieter, wobei mit Hilfe geeigneter Konzepte die Anforderungen und Bedürfnisse nach flexibler und individueller Mobilität der Benutzer berücksichtigt sowie die Kosten durch Leerfahrten oder zu Zeiten niedrigen Bedarfs gesenkt werden können. Eine verstärkte Orientierung an den Bedürfnissen der Benutzer kann zur Steigerung der Lebensqualität beitragen. In der Regel steigt allerdings auch der Aufwand für den Betrieb und die Anzahl der benötigten Fahrzeuge, weshalb auch die Wirtschaftlichkeit eine entscheidende Rolle spielt. Somit muss insbesondere bei bedarfsorientierten Transportsystemen zwischen den entstehenden Betriebskosten und der resultierenden Dienstqualität ein Kompromiss gefunden werden. Die Überwachung der aktuellen Umweltsituation in städtischen Regionen, fällt primär in den Aufgabenbereich der Administration. Basierend auf diesen Daten kann der Effekt von Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Umweltschutz kontrolliert werden und hat damit auch einen direkten Einfluss auf die Lebensqualität in einer Stadt. Allerdings haben einschneidende Maßnahmen auch Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit und damit auf den wirtschaftlichen Einfluss von Metropolregionen. Detaillierte Informationen über die Umweltsituation können allerdings auch als Grundlage für eine nachhaltige Planung und Erweiterung oder Anpassung der Verkehrsinfrastruktur dienen. Eine weiterführende Bereitstellung und Verwendung dieser Daten kann auch für andere Bereiche relevant sein und beispielsweise im Zusammenhang mit dem Verkehrsmanagement eine umweltsensitive Verkehrsbeeinflussung ermöglichen oder in Form von zusätzlichen Reiseinformationen den Benutzern zur Verfügung gestellt werden.

2.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst die Begriffe Kooperation und Mobilität in den Rahmen dieser Arbeit eingeordnet. Megastädte bilden hierbei den Kontext in dem die kooperative Mobilität dazu beitragen kann, den bestehenden und zukünftigen Herausforderungen zu begegnen. Dabei handelt es sich, je nach Definition, um Städte mit mindestens 10 Millionen Einwohnern in denen sich unter anderem die verkehrsrelevanten Probleme

konzentrieren. Auf die grundlegenden Herausforderungen wurde im Anschluss eingegangen, wobei die Zusammenhänge zwischen der Wettbewerbsfähigkeit, der Lebensqualität und der Umwelt erläutert wurden. Im weiteren Verlauf wurden die wesentlichen Akteure zusammen mit deren Aufgaben umrissen. Unter Berücksichtigung der Bedürfnisse und anhand der unterschiedlichen Perspektiven der Akteure wurden hierbei die nicht-funktionalen Anforderungen abgeleitet und mit den zuvor beschriebenen Herausforderungen in Verbindung gebracht. Die Verkehrsforschung beschäftigte sich in der Vergangenheit intensiv mit Problemen rund um die Mobilität, wobei sogenannten kooperativen Verkehrssystemen, die als eine relativ junge Disziplin der Intelligenten Transportsysteme in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen haben, ein großes Potenzial eingeräumt wird. Diese Systeme befassen sich insbesondere mit den technischen und konzeptionellen Möglichkeiten, wie den bestehenden Problemen zu begegnen ist. Basierend auf den Kernbereichen und der Klassifikation von ITS wurde abschließend eine Eingrenzung, auf die im Rahmen dieser Arbeit adressierten Bereiche, vorgenommen. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit verwandten Arbeiten aus den Bereichen: Reiseinformationen, Verkehrsmanagement, bedarfsorientierter Transport und Umweltüberwachung. Hierbei wird dabei einerseits ein besserer Überblick bestehender Ansätze gegeben und andererseits ein tieferer Einblick in die aktuelle Forschung ermöglicht.

FORSCHUNGSARBEITEN AUS DEN ADRESSIERTEN ITS BEREICHEN

Im vorangegangenen Kapitel wurden neben den grundlegenden Herausforderungen, die wesentlichen Akteure und die adressierten Bereiche vorgestellt, mit denen sich die vorliegende Arbeit befasst. Unter Berücksichtigung der vier relevanten Themenfelder sollen in diesem Kapitel verwandte Arbeiten vorgestellt werden, um einerseits einen tieferen Einblick in die aktuelle Forschung zu ermöglichen und andererseits eine Abgrenzung zu den entsprechenden Themen zu schaffen. Damit bezieht sich die Betrachtung verwandter Arbeiten auf die Themenfelder Reiseinformationen, Verkehrs- bzw. Parkraummanagement, öffentlicher Verkehr und Umweltüberwachung.

3.1 Reiseinformationen

Reiseinformationen und deren Bereitstellung mit Hilfe entsprechender Dienste beinhalten zahlreiche Aspekte von der proaktiven Unterstützung der Benutzer im Zusammenhang mit Mobilität, über Informationen bezüglich möglicher Alternativen bis hin zu übergreifenden Reiseauskunfts- und Informationsportalen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Bereitstellung und Nutzung von Informationen bezüglich des öffentlichen Verkehrs und möglichen Mobilitätsalternativen, die im Folgenden vorgestellt werden.

3.1.1 Mobile Routenplanung und Navigation

Hinsichtlich der individuellen Routenplanung im öffentlichen Verkehrsnetz existieren unterschiedliche Ansätze, die im Wesentlichen auf einer Client-Server Architektur basieren, um für den Benutzer abhängig von seinen Präferenzen und Fähigkeiten oder basierend auf dem aktuellen Kontext in Form von Position und Zeit eine ideale Route zu berechnen.

Mobility Agents [277] ist ein System zur Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs für kognitiv eingeschränkte Personen. Die Mobilitätsanbieter liefern Informationen über die aktuellen Positionen, die jeweiligen Geschwindigkeiten und Richtungen der Fahrzeuge. Die zentrale Komponente des Systems ist die Mobility Agents Engine und dient als Schnittstelle zwischen Mobilitätsanbieter, Betreuungsperson sowie der zu betreuenden Person und koordiniert den gesamten Informationsfluss zwischen diesen Akteuren. Die Person mit kognitiven Einschränkungen nutzt ein mobiles Endgerät, mit dem die Position mittels des globalen

Positionierungssysteme (englisch: Global Positioning System, GPS) festgestellt wird und welches diverse Ausgabeschnittstellen (Sprache, Text, Bild) zur Interaktion mit dem Benutzer anbietet. Über die Schnittstelle des Betreuers wird die Position der zu betreuenden Person angezeigt und auf einer Karte zusammen mit den Bewegungen der Busse animiert. Des Weiteren wurde eine Instant Messaging Anwendung integriert, über die der Betreuer Informationen in Form einer Statusmeldung erhält, die automatisch anhand der aktuellen Position oder entsprechender Ereignisse gesendet wird. Vorgeschlagene Verbesserungen beziehen sich einerseits auf die Erhöhung der Genauigkeit bei der Positionsbestimmung und andererseits auf den Einsatz einer geeigneten Hardware, die den Bedürfnissen von Personen mit kognitiven Einschränkungen gerecht wird.

In [19] wird Bus Catcher vorgestellt und in eine agentenbasierte Architektur [299] überführt. Es handelt sich dabei um eine kontextsensitive Anwendung für Nutzer des öffentlichen Verkehrs, die auf einer Client-Server Architektur basiert. Mit Hilfe eines GPS Empfängers werden sowohl die Position des Benutzers als auch die der Busse bestimmt. Die vom Benutzer übertragenen Positions- und Profildaten werden dann von einem zentralen System verarbeitet, wobei basierend auf den zu erwartenden Ankunftszeiten der Busse geeignete Routen berechnet und proaktiv an den Client übermittelt werden. Auch in [33] wird für die ortbezogene Anwendung GPS verwendet. Hierbei werden die Haltestellen, die sich in der Nähe des Benutzers befinden auf einer Karte angezeigt. Dabei kann der Benutzer entweder selbst eine Buslinie auswählen oder diese wird abhängig von seinem Ziel automatisch vom System bestimmt.

In [128] wurde die damalige Anwendung aus [129] dahingehend geändert, dass anstelle des Trambahnnetzes das Busnetz genutzt werden kann. Die Anwendung berechnet und aktualisiert eine Route basierend auf den persönlichen Kalendereinträgen und der aktuellen Position des Benutzers und informiert diesen über den Zeitpunkt an dem die Reise angetreten werden muss. Zusätzlich stehen Informationen über die erwartete Reisezeit, die Gehdistanz und die Anzahl der Fahrzeugwechsel zur Verfügung.

Zheng et al. [335] beschäftigen sich in diesem Zusammenhang mit dem Tracking, d.h. mit der Erfassung der Positionen von öffentlichen Verkehrsmitteln anhand derer die Abfahrtszeiten in Echtzeit bestimmt werden können. Mittels GPS-Empfängern werden die Positionen der einzelnen Fahrzeuge erfasst und basierend auf der Distanz und der Geschwindigkeit die erwartete Ankunftszeit für den nächsten Halt bestimmt. Aus Sicht des Mobilitätsanbieters lassen sich anhand der Positionen und Zeiten mögliche Engpässe erkennen, und aus Sicht des Benutzers können somit lange Wartezeiten, insbesondere bei schlechtem Wetter, vermieden werden. Als mögliche Verbesserung wird lediglich die zusätzliche Nutzung einer Karte zur Visualisierung in Aussicht gestellt.

Ferris et al. [77] entwickelten eine Software für Fahrgastinformationen, die basierend auf ortsbezogenen Diensten zur Verbesserung der Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs beitragen kann. Die Anwendung verwendet hierfür ebenfalls eine klassische Client-Server Architektur, wobei der Client im Wesentlichen eine Benutzerschnittstelle anbietet und entsprechende Positionsdaten über eine mobile Netzwerkanbindung zum Server überträgt. Der Server ist zuständig für die eigentliche Routenberechnung und Verarbeitung von zusätzlichen

Informationen. Für Detailinformationen der nächsten Haltestellen werden sowohl die Ankunfts- als auch die Abfahrtszeiten der jeweiligen Linien in Echtzeit präsentiert. Daneben bietet die Anwendung eine rudimentäre Navigationsfunktionalität für das Busnetz in Seattle. Künftige Verbesserungen fokussieren sich auf die Integration beeinträchtigter Personengruppen, um eine barrierefreie Nutzung zu ermöglichen. Ein weiterer Aspekt ist die Integration der Echtzeitdaten in den Routenplanungsprozess.

Aguiar et al. [3] stellen einen persönlichen Navigator für das öffentliche Transportnetz vor, der auf dem Radio Frequency Identification (RFID) Standard basiert. Dabei kommt ein Bezahlungssystem mittels RFID Ticketing zum Einsatz, wobei neben dem eigentlichen Bezahlvorgang auch Informationen über den Standort des Lesegerätes sowie die Benutzerkennung vom System ausgelesen werden. Zusätzlich lassen sich vom Benutzer mehrere Ziele angeben, die ebenfalls dem System zugänglich sein müssen. Anhand dieser Informationen, einem Geoinformationsdienst, der für das Geocoding zuständig ist, den Positionsdaten von Zielen in Form von Anziehungspunkten (englisch: Points of Interest, PoI) und Haltestellen sowie dem zugrundeliegenden Transportnetz wird eine optimale Route zu den vom Benutzer angegebenen Zielen erzeugt und über den Short Message Service (SMS) bereitgestellt. Als Verbesserung wird von den Autoren die Berücksichtigung von Echtzeitinformationen bezüglich der Abfahrtszeiten vorgeschlagen.

Jariyasunant et al. [121] stellen ein System vor, bei dem die Live Daten von öffentlichen Nahverkehrsanbietern beim Routing oder vielmehr bei der zu erwartenden Fahrzeit berücksichtigt werden. Dem Benutzer werden dabei die 5 schnellsten Wege in Form eines XML Dokuments angeboten zwischen denen entschieden werden kann. Das System besteht hauptsächlich aus drei Komponenten: dem Client, dem Routing Server und externen Informationsanbietern. Die Informationsanbieter sind gleichzeitig die Betreiber des öffentlichen Nahverkehrsnetzes, die neben den Positionsdaten der Haltestellen und den zugehörigen Routen sowohl statische Fahrplaninformationen als auch dynamische Echtzeitdaten über die Ankunftszeiten der Busse zur Verfügung stellen. Die Autoren schlagen für die Aktualisierung der Kantengewichte des Graphen zwei Ansätze vor: Zum einen die Aktualisierung der Zeiten der begehbaren Wege vom Start zum Ziel bei der Anfrage eines Benutzers. Dies hat den Vorteil, dass nicht bei jeder Änderung sämtliche Wege neu berechnet werden müssen. Zum anderen einen Brute Force Ansatz, der bei jeder Abweichung der Zeiten die Wege neu berechnet.

In [20] wird das TransitGenie System vorgestellt, welches sich mittlerweile im produktiven Einsatz befindet. Die Benutzer können sich basierend auf ihrer aktuellen Position, per Kartenausschnitt oder mittels der Adresseingabe eine optimale Route berechnen lassen. Hierbei werden die notwendigen Informationen an einen zentralen Server übertragen, der dann zunächst auf den statischen Fahrplaninformationen mögliche Routen berechnet. Sofern für die Fahrzeuge Echtzeitdaten in Form von Positionsdaten verfügbar sind, werden in einem zweiten Schritt die zuvor berechneten Routen aktualisiert und an den Benutzer übermittelt.

Bei den genannten Systemen und Anwendungen, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind, handelt es sich in der Regel um Client-Server Architekturen, wobei auf dem Server mittels angepasster Verfahren eine Route berechnet wird. Die Besonderheit der zahlreichen für diesen Anwendungsfall optimierten Verfahren ([111, 99, 56, 145, 113, 301]) ist primär das getaktete

System	Nutzung von Präferenzen/-Kontext	Haltestellen-/Fahrzeuginformationen	Pre-Trip/On-Trip Routenplanung	of ine Nutzung/Echtzeitinformationen	Tür-zu-Tür Navigation
Mobility Agents [277]	+/+	-/+	+/+	-/-	-
Bus Catcher [19, 299]	+/+	+/+	+/+	-/-	-
TramMate, Buster [129, 128]	-/+	+/+	+/-	-/k.A.	k.A.
LBS for Public Transport [335]	-/-	+/+	+/-	-/+	k.A.
Location-aware Public Transit [77]	-/-	+/-	-/-	-/+	-
RFID Navigator [3]	k.A./k.A.	-/-	+/+	-/+	-
Mobile Transit Trip Planning [121]	0/+	+/-	+/+	-/+	+
TransitGenie [20]	+/+	-/-	+/+	-/+	+

Legende: + erfüllt, - nicht erfüllt, 0 teilweise erfüllt, k.A. keine Angabe

Tabelle 3.1: Mobile Anwendungen für den öffentlichen Verkehr

öffentliche Verkehrsnetz und die Möglichkeit oder Notwendigkeit von Fahrzeugwechseln. Dabei können einerseits die entsprechenden Wegabschnitte nur zu bestimmten Zeiten befahren werden, weshalb zusätzlich die Wartezeit berücksichtigt werden muss und andererseits können unter anderem Parameter wie die Gehdistanz oder die maximale Anzahl der Fahrzeugwechsel berücksichtigt werden. Wie aus den vorgestellten Arbeiten hervorgeht, befassten sich bisherige Arbeiten insbesondere mit der Unterstützung von Benutzern mit besonderen Anforderungen bezüglich der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel. Zahlreiche Systeme bieten auch Informationen über die Positionen und aktuellen Abfahrtszeiten der jeweiligen Verkehrsmittel, wobei letztere anhand der aktuellen Fahrzeugposition berechnet werden können. Neben der Planung einer Reise im Vorfeld (Pre-Trip) befassten sich vergleichsweise wenige Arbeiten mit der Unterstützung und Routenaktualisierung nachdem die Reise bereits angetreten wurde (On-Trip). Auf Grund der favorisierten Client-Server Architektur ist keines der vorgestellten Systeme in der Lage den Benutzer auch unabhängig von einer bestehenden Internetverbindung eine entsprechende Unterstützung oder Informationen während der Reise anzubieten.

3.1.2 Informationen über Mobilitätsalternativen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich innerhalb der Reiseinformationen mit der Nutzung von Mobilitätsalternativen. Nachdem diese öffentlich genutzt werden können, stellen beispielsweise gemeinschaftliche Transportkonzepte eine Mobilitätsalternative zum öffentlichen Verkehr dar. Insbesondere in den letzten Jahren haben diese Ansätze an Bedeutung gewonnen, so dass einige Pilotprojekte in Kooperation mit den Automobilherstellern oder anderen Mobilitätsdienstleistern gestartet wurden. Einige Vertreter sind DriveNow (BMW) [202], Car2Go (Daimler) [334], Mu (Peugeot) [224] und ZebraMobil [260], aber auch Flinkster und Call-a-Bike (DB) [208, 188] gehören dieser Kategorie an. In diesem Zusammenhang wird mit Hilfe mobiler Anwendungen unter anderem die Position der Benutzer bestimmt, die nach der Anfrage eine Liste mit in Nähe befindlichen Fahrzeugen abrufen und eine entsprechende

Reservierung für das Fahrzeug vornehmen können.

Eine weitere Variante sind Fahrgemeinschaften, wobei in der Regel ein privater PKW verwendet wird und der Fahrer bereit ist andere Personen, sofern sich deren Ziel mit dem eigenen kombinieren lässt, mitzunehmen. Bei der Mitfahrzentrale [222] oder dem Pendlernetz [237] handelt es sich um entsprechende Plattformen, bei denen Suchende die eingetragenen Angebote nach ihren Präferenzen filtern können oder auch selbst Angebote, mit Start, Ziel, Zeit und weiteren Informationen einstellen können. Durch die Nutzung von modernen Mobiltelefonen ergeben sich auch in diesem Zusammenhang neue Möglichkeiten, wie Fahrer und Mitfahrer zusammengebracht werden können. Ein Spezialfall von Fahrgemeinschaften stellen in diesem Zusammenhang Konzepte für die gemeinsame Nutzung von Fahrkarten im öffentlichen Verkehr dar, wobei entsprechende Ansätze bisher wenig Beachtung gefunden haben.

Piorkowski schlägt in [269] die Anwendung SmartRide vor, die auf Kurzstreckenkommunikation basiert und für den städtischen Verkehr und opportunistische Fahrten gedacht ist.

In [290] wird das DC2S System zur Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften vorgestellt. Basierend auf einer Client-Server Architektur übermitteln die Benutzer den aktuellen Aufenthaltsort und das Transportbedürfnis, wobei es sich entweder um ein Angebot oder um ein Gesuch handelt. Basierend auf diesen Informationen sucht der Server nach Übereinstimmungen zwischen den Benutzern.

Winter und Nittel haben sich in ihrer Arbeit [328] mit der spontanen Planung von Fahrgemeinschaften auf der Basis von Geosensornetzwerken beschäftigt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den notwendigen Kommunikationsstrategien, die zur lokalen Planung in hoch dynamischen Transportnetzen benötigt werden. Es wurden drei unterschiedliche Kommunikationsansätze (unbeschränkt, kurze und mittlere Reichweite) mit einem Verfahren welches eine vollständige Kenntnis über das Transportnetz bezüglich des Parameters Reisezeit verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass im Allgemeinen die Fahrzeit mit steigender Dichte von Fahrzeugen sinkt. Eine kurze Kommunikationsreichweite wirkt sich dabei negativ auf die Fahrzeit aus, aber die Anzahl der ausgetauschten Nachrichten ist am geringsten. Bei der mittleren Reichweite ergeben sich im Vergleich zur unbeschränkten Kommunikationsreichweite allerdings kaum noch Verbesserungen bezüglich der Fahrzeit, aber die Anzahl der gesendeten Nachrichten liegt deutlich darunter.

In [282] wurde der Nutzen von Fahrgemeinschaften im Vergleich mit dem Zurücklegen der Distanz zu Fuß untersucht. Hierbei wurden die Parameter Dichte der potenziellen Transportfahrzeuge, der Kommunikationsradius der Anfrage und die Anzahl der Kunden bzw. Benutzer untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Zeitersparnis bis 4000 Meter im Bereich von 8% liegt und mit steigender Kommunikationsreichweite auch keine höhere Ersparnis zu erwarten ist. Ähnliche Ergebnisse werden auch in [328] vorgestellt, wobei sich die Zeitersparnis ebenfalls mit steigender Anzahl der Transportfahrzeuge erhöht. Bei einer konstanten, aber geringen Anzahl an Transportfahrzeugen im Gegensatz zur Anzahl der Benutzer lag die Zeitersparnis lediglich zwischen 3% bis 4%, da auf Grund des geringen Angebots nicht alle Mitfahrtsuche erfüllt werden konnten.

In [85] wird eine Architektur zur Unterstützung von dynamischen Fahrgemeinschaften

vorgestellt. Hierbei übermitteln die Benutzer des Systems ebenfalls ihre aktuelle Position sowie das Ziel an einen zentralen Server. Dieser erlaubt neben dem Routenabgleich zusätzliche Funktionalitäten, wie die Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage bei der Routenberechnung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit bezüglich der Treffpunkte und des jeweiligen Zeitpunktes.

OpenRide [84] ist ein vom Fraunhofer Institut entwickeltes System, welches den Benutzern einen spontanen Zusammenschluss zu Fahrgemeinschaften ermöglicht, auch wenn sich diese bereits auf dem Weg befinden. Dabei arbeitet das System ebenfalls mit einem zentralen Server der Transportanfragen und -angebote entgegennimmt und unter Verwendung intelligenter Routenkombinationsalgorithmen geeignete Partner findet. Ist eine Kombination sinnvoll, kann der Fahrer unter Kenntnis der Abholposition das Gesuch akzeptieren oder ablehnen. Nimmt der Fahrer das Gesuch an, wird der Zwischenstopp bzw. die Position des wartenden Mitfahrers übermittelt und das mobile Endgerät meldet dem Suchenden, dass ein passender Fahrer gefunden wurde. Sowohl die Abrechnung des Fahrpreises als auch eine Bewertung der Teilnehmer können über OpenRide abgewickelt werden. Eine weitere Anwendung aus diesem Bereich mit vergleichbarer Funktionalität ist Avego [182].

Mit diesen Systemen vergleichbar sind Anwendungen, die sich sowohl an die Fahrer als auch an die Benutzer von Taxen richten. Cab4me [187], Taxi.eu [249] oder myTaxi [227] sind Beispiele, bei denen die Position des Benutzers verwendet wird, um ein Taxi oder einen Taxistand in der näheren Umgebung zu finden. Dabei werden die notwendigen Informationen, wie die aktuelle Position, an einen zentralen Server übermittelt, der abhängig von den Präferenzen und der Entfernung ein geeignetes Taxi auswählt. Wurde ein geeignetes Taxi gefunden, werden Fahrer und Fahrgast informiert und basierend auf der Route die zu erwartende Ankunftszeit sowie die aktuelle Position von Fahrer und Mitfahrer laufend aktualisiert.

Zusammenfassend können die genannten Systeme die Benutzer unterstützen entweder private oder gewerbliche Fahrgemeinschaften zu bilden. Dadurch kann die Auslastung bestehender Transportkapazitäten effizienter genutzt und somit das Verkehrsaufkommen insgesamt reduziert werden. Allerdings müssen Aspekte im Zusammenhang mit der Privatsphäre und dem Datenschutz berücksichtigt werden, um eine breite Akzeptanz zu erlangen. Diesbezüglich sind nach [90] viele Benutzer entsprechender Anwendungen besorgt über die Verwendung und weitere Nutzung ihrer persönlichen Daten, wie dem Bewegungsprofil, insbesondere wenn eine zentrale Komponente involviert ist. Mobile Anwendungen, die sich explizit mit einer gemeinschaftlichen Nutzung entsprechender Gruppenangebote im öffentlichen Verkehr auseinandersetzen sind kaum vorhanden. Eine Plattform über die gemeinschaftliche Fahrten mit der Bahn unterstützt werden ist Bahnbilliger [183], wobei bisher lediglich die Grundfunktionalität in Form von entsprechenden Angeboten und Gesuchen realisiert wurde.

In Tabelle 3.2 sind die vorgestellten Arbeiten zusammengefasst, die anhand einiger Aspekte verglichen wurden. Anhand dieser Aufstellung wird ersichtlich, dass sich bereits einige Arbeiten mit der Thematik dynamischer Fahrgemeinschaften auseinandergesetzt haben. Vielfach basieren diese Systeme auf einer Client-Server Architektur, wobei sich jüngere Ansätze unter

System	dynamische Fahrgemeinschaften	lokale Kommunikation	Positionsaktualisierung	Berechnung von Ein- Ausstiegspunkten	Bewertungs- und Bezahlungssystem
SmartRide [269]	+	+	k.A.	k.A.	k.A.
DC2S [290]	+	-	-	+	-
Ad hoc Shared Trip Planning [328]	+	+	-	-	-
Local Shared-Ride Trip Planning [282]	+	+	-	+	-
Dynamic Ride Sharing [85]	+	-	-	k.A.	+
OpenRide, Avego [84],[182]	+	-	k.A.	+	+
MyTaxi [227]	k.A.	-	+	+	+

Legende: + erfüllt, - nicht erfüllt, 0 teilweise erfüllt, k.A. keine Angabe, *) geplante Funktionalität

Tabelle 3.2: Anwendungen zur Unterstützung dynamischer Fahrgemeinschaften

Verwendung lokaler Kommunikation vorrangig auf die Analyse bezüglich der Fahrzeugdichte und der Informationsausbreitung beschäftigt haben. Im Gegensatz zur Berechnung statischer Treff- bzw. Ein- oder Ausstiegspunkte ist eine dynamische Aktualisierung der Positionen potenzieller Mitfahrer bisher nur vereinzelt berücksichtigt worden.

3.2 Verkehrsmanagement

Der Bereich des Verkehrsmanagements reicht von der Steuerung digitaler Straßenschilder und Lichtsignalanlagen über die Durchführung von und die Verkehrsorganisation bei baulichen Maßnahmen bis hin zur Planung und Überwachung der Transport- und Verkehrsinfrastruktur. In der Transportdomäne sind agentenbasierte Systeme, die in [35] zusammengefasst sind, ein vielversprechender und verbreiteter Ansatz, um den Problemen im Zusammenhang mit dem Verkehr zu begegnen. Neben der Steuerung und Kontrolle existieren allerdings noch andere Teilbereiche, die sich mit der aktuellen Verkehrssituation auseinandersetzen. Hierbei spielt auch die Verwaltung und die Organisation des Parkraumes eine wichtige Rolle. Die vorliegenden und zur Verfügung gestellten Informationen können aus Sicht des Benutzers zu den Reiseinformationen gezählt werden, aber aus Sicht der Administration ist die Parkraumverwaltung ein Teilbereich des Verkehrsmanagements, mit dem Ziel den dadurch entstehenden Parkplatzsuchverkehr zu reduzieren. Im Folgenden richtet sich der Fokus auf kollaborative Systeme, bei denen die einzelnen Akteure gemeinschaftlich zusammenarbeiten, um Informationen über freie bzw. belegte Parkplätze zur Verfügung zu stellen. Das Ziel ist eine bessere und intelligentere Nutzung des vorhandenen Parkraumes, die eine Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs nach sich zieht und einen positiven Effekt auf den gesamten Verkehr hat.

3.2.1 Gemeinschaftliches Parkplatzmanagement

In einigen Arbeiten über den Parkplatzzuchverkehr konnte festgestellt werden, dass ein deutliches Einsparungspotenzial gegeben ist, da dieser mit durchschnittlich 30% zum Gesamtverkehrsaufkommen der untersuchten Städte beiträgt [294]. Nach einer in New York durchgeführten Studie [201] über 15 Blocks in der Upper Westside wurde festgestellt, dass während der Parkplatzsuche jährlich rund 590000 Kilometer zurückgelegt werden und damit zu einer Mehrbelastung von ca. 325 Tonnen CO_2 und Mehrausgaben von ca. 90000 € führt. Daher wurden entsprechende Anstrengungen unternommen, um Konzepte zu entwickeln, die eine effizientere Parkraumbewirtschaftung ermöglichen. In zahlreichen Städten werden Autofahrer mit Hilfe elektronischer Anzeigetafeln oder anderen Ausprägungen von Parkleitsystemen über die aktuelle Parkplatzsituation informiert. Wie auch schon bei den zuvor besprochenen Reiseinformationsdiensten aus Abschnitt 3.1, bieten mobile Endgeräte oder Fahrzeugnavigationssysteme im Zusammenhang mit der Parkraumbewirtschaftung neue Möglichkeiten.

OpenSpot [234] war ein zweijähriges Experiment der Google Incorporated, bei dem die Benutzer der Anwendung die Möglichkeit hatten, basierend auf der aktuellen Position einen freien Parkplatz mit Hilfe eines mobilen Endgerätes zu markieren. Anderen Nutzern der Anwendung, die auf der Suche nach einem Parkplatz waren, konnten diese Informationen in einem Umkreis von ca. 1,5 km zur Verfügung gestellt werden. Somit basierte diese Anwendung zwar auf dem gemeinschaftlichen Zusammenwirken der Benutzer. Allerdings wurden die Backend Server der Anwendung nach dem Ende der Testphase am 25. Juni 2012 auf Grund der geringen Nutzerzahlen heruntergefahren.

Ein anderes Projekt ist SFPark [244], das von der San Francisco Municipal Transportation Authority umgesetzt wird und ohne eine gemeinschaftliche Zusammenarbeit der Benutzer bei der Markierung freier Parkplätze auskommt. Hierbei erkennen in den Asphalt eingelassene Sensoren die aktuelle Belegung und senden diese Information über eine Funkschnittstelle zu einem nahegelegenen Gateway, der diese an die zuständige Zentrale weiterleitet. Die Daten werden dann zum einen über ein Internetportal potenziellen Benutzern zur Verfügung gestellt und zum anderen werden sie genutzt, um ein bedarfsabhängiges Preismanagement zu realisieren. Zusätzlich berücksichtigt das System Informationen über die Belegung von 14 Parkhäusern in San Francisco. Die fest installierten Sensoren für jeden einzelnen Parkplatz sorgen dabei für eine hohe Zuverlässigkeit des Systems. Allerdings ist dies mit verhältnismäßig hohen Kosten für Installation und Instandhaltung verbunden.

ParkNet [300] ist ein System, welches auf mobilen Sensoren zur Erfassung von freien Parkplätzen aufbaut. Hierbei werden Taxen mit Ultraschallsensoren ausgestattet und mit Hilfe der dadurch möglichen Entfernungsmessung freie Straßenparkplätze im Vorbeifahren detektiert. Die Messwerte werden im Anschluss, zusammen mit den notwendigen Positionsdaten, an einen zentralen Server übermittelt, der für die Auswertung verantwortlich ist. In diesem Zusammenhang wurden Klassifikatoren zur Erkennung von markierten und unmarkierten Parkplätzen entwickelt und evaluiert. Zusätzlich wurden die Kosten für ein System mit mobilen Sensoren denen aus dem SFPark Projekt gegenübergestellt, und ermöglichen eine

vergleichbare Funktionalität mit erheblich geringerem Kosteneinsatz.

Ein weiteres Projekt mit wissenschaftlichem Hintergrund ist IRIS [91], wobei es sich um einen möglichen Ansatz für ein globales Netzwerk aus intelligenten Sensorknoten handelt. Dabei können mit Hilfe entsprechender Anfragen an das System Messwerte unterschiedlicher Sensoren abgefragt werden. Eine Beispielanwendung ist ein Parking Space Finder, wobei die Sensoren durch Kameras repräsentiert werden, die mehrere Spielzeugparkplätze bezüglich der Belegung überwachen. Damit wurden unterschiedliche Parkzonen mit freien und besetzten Parkplätzen simuliert. Über eine Webschnittstelle konnte der Benutzer ein Ziel auswählen, wobei eine Anfrage bezüglich eines freien Parkplatzes unter Verwendung von IRIS gesendet wurde. Nachdem die Anfrage an das Sensornetz verarbeitet wurde, wird dem Benutzer eine Route zu diesem Platz vorgeschlagen und abhängig von der Position aktualisiert. Ein ebenfalls mit Kameras und unter realen Bedingungen arbeitendes System wird in [21] vorgestellt.

Ein weiteres Informationssystem, mit dem sich Benutzer über zur Verfügung stehende Parkplätze erkundigen können, ist ein von BMW im Rahmen des Projekts ConnectedDrive entwickelte ParkInfo [185]. Hierbei kann auf der Internetseite über eine Eingabemaske das Ziel zusammen mit Präferenzen eingegeben werden und das System antwortet mit entsprechenden Parkhäusern oder Großraumparkplätzen in der Nähe des Ziels. Falls vorhanden werden auch zusätzliche Informationen über die Öffnungszeiten oder den Preis zur Verfügung gestellt. Bei diesem System werden allerdings lediglich Großraumparkplätze berücksichtigt.

Bei SmartPark [269] handelt es sich um einen Vorschlag für ein dezentrales, kollaboratives Parkplatzmanagement System, bei dem die Belegung mit Hilfe von Sensoren erfasst werden kann. Diese Sensoren verteilen den aktuellen Status des Parkplatzes über drahtlose Kommunikation und können auf Reservierungsanfragen reagieren. Mit Hilfe einer Simulation wurde ein Verfahren unter Verwendung zentral vorliegender Parkplatzinformationen mit einem generischen Ansatz zur Parkplatzsuche verglichen. Der generische Ansatz basiert auf der Annahme, dass ein freier Parkplatz in einer Entfernung von 30 Metern gesehen und genutzt wird. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Dauer bis ein Parkplatz unter Verwendung des vorgeschlagenen Systems gefunden wurde deutlich verringert werden kann und folglich die Verkehrsdichte gegenüber dem generischen Ansatz schneller abnimmt.

System	Automatische Parkvorgang- erfassung	Straßenpark- plätze	Parkhäuser	Kollaboratives System	Reservierung und Bezahlsystem
OpenSpot [234]	-	+	-	+	-
SFPark [244]	+	+	+	-	+
ParkNet [300]	-	+	-	-	-
Parking Space Finder [91, 21]	+	0	0	-	-
BMW ParkInfo [185]	+	-	+	-	-
SmartPark [269]	k.A.	k.A.	k.A.	+	0

Legende: + erfüllt, - nicht erfüllt, 0 teilweise erfüllt, k.A. keine Angabe

Tabelle 3.3: Systeme und Anwendungen zur (kollaborativen) Parkplatzverwaltung

Ein umfassender Überblick weiterer Arbeiten im Umfeld des Parkraummanagements, bei dem zusätzlich die möglichen Technologien ausgeführt werden, wird in [116] gegeben.

Die hier vorgestellten Systeme sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Hierbei hat sich gezeigt, dass unter Verwendung spezieller Sensoren die Belegung eines Parkplatzes erkannt und weitergeleitet werden kann. Allerdings stammen die notwendigen Daten hauptsächlich von Sensornetzwerken, Kameras oder speziellen Sensoren, die in bestimmte Fahrzeuge integriert werden und somit einen entsprechenden Aufwand für die Ausbringung und Wartung erfordern. Dabei können die Kosten im Vergleich zur Ausstattung einzelner Parkplätze mit Sensoren, wie bei SFPark, erheblich reduziert werden. Eine gemeinschaftliche manuelle Erfassung der notwendigen Daten, die keinerlei Infrastruktur voraussetzen, hat sich ebenfalls nicht bewährt, wie die geringen Nutzerzahlen belegen, die schließlich zur Einstellung der Anwendung OpenSpot geführt haben. Einer automatischen Erfassung basierend auf den lokal verfügbaren Informationen fand bisher kaum Beachtung.

3.3 Öffentlicher Verkehr

In Verbindung mit dem öffentlichen Verkehr werden von [7] das Management des Nahverkehrs und die Bedarfsorientierung sowie der gemeinsame Transport genannt. Das Management befasst sich hierbei unter anderem mit Informationssystemen, den sogenannten Real-Time Passenger Information (RTPI) Systems, Fahrpreisinformationen, Routenplanern, aber auch mit der Flottenüberwachung und -aufteilung sowie dem Einsatz von Prioritätssystemen. Bezüglich des Flottenmanagements und der RTPI Systeme spielt insbesondere die Positionsbestimmung und -verfolgung von Fahrzeugen (englisch: Automatic Vehicle Location, (AVL)) eine wichtige Rolle. Dabei handelt es sich um Systeme, die die aktuelle Position des Fahrzeugs an eine Zentrale übermitteln, wodurch zusätzliche Informationen im Fahrzeug oder den Haltestellen verfügbar gemacht werden können. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit konzentriert sich allerdings im Wesentlichen auf die Bedarfsorientierung, wobei nachfolgend einige Arbeiten und Systeme aus diesem Bereich vorgestellt werden.

3.3.1 Bedarfsorientierter Transport

Eine stärkere Bedarfsorientierung bezieht sich entweder auf die bereits im Abschnitt 3.1.2 angesprochenen Mobilitätsalternativen, die dem Benutzer mehr Flexibilität, beispielsweise durch entsprechende Car-Sharing Angebote, bieten oder sogenannte Rapid Transit Systeme, bei denen eine oder mehrere separate Spuren für öffentliche Verkehrsmittel - hauptsächlich Busse - zur Verfügung stehen, auf denen kurze Taktzeiten erreicht werden können und die durch mehrere Zubringerlinien gespeist werden. Andere Bezeichnungen in Verbindung mit dem bedarfsorientierten Transport, die sich auf den schienengebundenen Verkehr konzentrieren, sind Personal Rapid Transport bzw. Group Rapid Transport Systeme. Im Rahmen des Niche Projekts [229] werden einige Beispiele solcher Systeme vorgestellt, bei denen entweder selbstfahrende Busse oder Kleinzüge dezidierte Strecken abhängig vom Bedarf oder dem Fahrgastaufkommen befahren. Die zuletzt genannten Ansätze können auch unter dem Begriff Demand Responsive Transport (DRT) zusammengefasst werden, die sich im Wesentlichen mit Konzepten zur Lösung des Dial-a-Ride Problems (DARP)

befassen. Dabei wird versucht, mit einer bestimmten Anzahl von Fahrzeugen die Fahrgäste an den jeweiligen Startpunkten abzuholen und unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Parametern, wie Zeitfenstern oder Kapazitätsbeschränkungen, zum entsprechenden Zielort zu transportieren. Im Zusammenhang mit bedarfsorientierten Transportsystemen wurden in den letzten Jahrzehnten die Verfahren zur optimalen Aufteilung von Fahrgästen auf die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge ausführlich untersucht. Einige dieser Arbeiten sind in [266, 267] zusammengefasst und wurden bezüglich der berücksichtigten Einschränkungen, des verwendeten Algorithmus und der Problemgröße verglichen. Neben den theoretischen Ansätzen und den entsprechenden Simulationen wurden auch einige Pilotprojekte [194] in der Praxis durchgeführt. Auf das eben genannte DARP, bei dem es sich um eine spezielle Unterklasse des Traveling Salesman Problems (TSP) handelt, und das daher auch mit dem Pickup and Delivery Problem (PDP) verwandt ist, wird in Abschnitt 4.3.2 genauer eingegangen.

In der Vergangenheit konzentrierten sich viele bedarfsorientierte Systeme auf den Transport von Personen mit Einschränkungen [156, 268]. In [22] wird beispielsweise ein System vorgestellt, welches sich mittlerweile im produktiven Einsatz befindet, bei dem die Kunden ihren Transportbedarf, Start und Ziel sowie Zeiten und andere Präferenzen angeben können. Das System ermittelt abhängig von diesen Informationen eine geeignete Aufteilung der Fahrgäste auf die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge und plant entsprechende Touren. Hierbei werden in einem zweistufigen Ansatz zunächst die Anfragen nach 5 Kriterien zusammengefasst und anschließend die entstandenen Cluster in eine oder mehrere Touren überführt, wobei nach den Betriebskosten oder der Distanz der Fahrzeuge optimiert werden kann. Dabei verarbeitet das System 1000 bis 1500 Transportanfragen pro Tag und verteilt diese auf ca. 100 Minibusse.

Ein System in Kopenhagen, welches sich mit dem Transport älterer oder behinderter Menschen beschäftigt wird in [153] vorgestellt. Dabei wurde eine Einfügeheuristik zur Lösung des DARP entwickelt, die unter anderem Zeitfenster und unterschiedliche Sitzplatzkonfigurationen der Fahrzeuge berücksichtigt. Der Algorithmus erlaubt eine multivariate Optimierung bezüglich der Kosten, der Fahrzeit und der Fahrzeugauslastung. Das Verfahren erlaubt auch die dynamische Berücksichtigung neuer Transportanfragen und erlaubt die Verarbeitung von ca. 140 Anfragen pro Tag. Mit dem Transport besonderer Personengruppen setzt sich auch [276] auseinander, wobei ein genetischer Algorithmus zur Berechnung optimaler Routen für ein Transportsystem in Brüssel verwendet wird.

In [293, 174] wird die Verwendbarkeit von einem Dial-a-Ride Bussystem mit einem herkömmlichen Bussystem, welches auf festen Routen basiert, verglichen. Dabei wurden zwei Fälle untersucht: (a) das Systemverhalten bei einer festen Anzahl von Bussen und (b) die Anzahl der Fahrzeuge richtet sich nach dem Bedarf bzw. der Anzahl der Anfragen. Mit Hilfe von Simulationen konnte gezeigt werden, dass der Nutzen des Dial-a-Ride Systems mit einer festen Anzahl von Bussen bei steigendem Bedarf sinkt. Im Gegensatz dazu ist das herkömmliche System robust gegenüber einem Bedarfsanstieg sofern die Kapazität der Fahrzeuge nicht überschritten wird. Wenn die Anzahl der Fahrzeuge an den Bedarf angepasst wird, steigt der Nutzen des Dial-a-Ride Systems schneller als der des herkömmlichen Systems.

Auch in [149] steht die Untersuchung der Verwendbarkeit eines bedarfsorientierten Systems im Vordergrund. In diesem Zusammenhang wurde eine Simulationsumgebung für ein

bedarfsorientiertes Bussystem in Shanghai entwickelt. Die Fahrzeuge werden durch Agenten modelliert, die um neue Transportanfragen konkurrieren indem bei der Routenplanung versucht wird, die zurückzulegende Distanz zu minimieren. Der Benutzer erhält das beste Angebot der geplanten Route von einer Zentrale und kann sich zwischen dem bedarfsorientierten Bussystem und dem existierenden Bussystem entscheiden, wobei Parameter, wie die Wartezeit oder die Fahrzeit, die Entscheidung beeinflussen.

Ein ebenfalls auf Agenten basierendes System wird in [57] für den Logistikbereich vorgeschlagen. Dabei wurde unter Verwendung von drei unterschiedlichen Bottom-Up Optimierungsansätzen versucht, einzelne Aufträge zwischen den zur Verfügung stehenden Fahrzeugagenten mit dem gemeinsamen Ziel der Gesamtkostenminimierung auszutauschen. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit diesen Ansätzen eine deutliche Verbesserung bezüglich der zurückgelegten Kilometer, der Leerfahrten sowie der verletzten Zeitfenster gegenüber der manuellen Verteilung erreicht werden kann.

In [154] wird ein bedarfsorientiertes Bussystem für den College Park der Universität in Maryland vorgestellt. Hierbei wird das bestehende Bussystem mit Hilfe einer Simulation mit den vorgeschlagenen Ansätzen verglichen. Bei dem k-means Verfahren werden den Fahrzeugen zunächst eingehende Anfragen von einem zentralen System mit Hilfe eines Clustering Verfahrens zugewiesen und anschließend wird basierend auf der Wartezeit und der Distanz zur Abhol- bzw. Zielposition das nächste Ziel des Fahrzeugs bestimmt. Das poolbasierte Verfahren arbeitet mit einer lokalen Liste für bereits abgeholte Fahrgäste und einer globalen Anfrageliste auf die jedes Fahrzeug zugreifen kann. Für jeden Knoten den das Fahrzeug erreicht, wird überprüft, ob es sich um einen Zielpunkt aus der lokalen Liste oder einen Abholpunkt aus der globalen Liste handelt. Das nächste Ziel wird lediglich in Abhängigkeit der Wartezeit bestimmt, wobei das Fahrzeug einen Zwischenstopp und einen Zielpunkt berechnet. Untersucht wurden die Auswirkungen auf die Wartezeit, die Fahrzeit und die von den Fahrzeugen zurückgelegte Distanz bezüglich einer unterschiedlichen Anzahl von Anfragen pro Minute und einer unterschiedlichen Anzahl von Fahrzeugen. Die Untersuchungen zeigten, dass ein bedarfsorientiertes System insbesondere zu Zeiten von geringen Anfragen sinnvoll ist, wohingegen bei steigenden Anfragen ein statisches System, wie das bestehende, auf Grund der Skalierbarkeit geeigneter erscheint.

Eine Heuristik zur Lösung des PDP mit Umlademöglichkeiten wird in [162] vorgestellt und basiert auf einem Logistikunternehmen im Großraum von San Francisco. Die Heuristik besteht aus einer Konstruktionsphase und einer Optimierungsphase. In der ersten Phase werden den Fahrzeugen Anfragen zugewiesen, welche die geringste Kostensteigerung verursachen. Hierbei werden über mehrere Iterationen und mit unterschiedlichen initialen Anfragekonfigurationen verschiedene Lösungen erzeugt. Die beste Lösung wird zur Initialisierung der zweiten Phase verwendet, bei der sukzessiv jede Anfrage entfernt und nach Möglichkeit unter geringeren Kosten wieder eingefügt wird bis es zu keiner weiteren Verbesserung kommt. Anhand von Simulationen konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von Umlademöglichkeiten die Gesamtdistanz der Fahrzeuge reduziert werden kann, sofern die Anfragen gleichmäßig über das Gebiet verteilt sind. Dieser Effekt wird bei einer stärkeren, räumlichen Ansammlung der Anfragen noch verstärkt. Allerdings wird hierbei eine unbegrenzte Kapazität der Fahrzeuge angenommen und

mögliche Umladepositionen sind begrenzt und Vorfeld festgelegt.

Eine mathematische Formulierung zur Lösung des PDP, bei dem auch Fahrzeugwechsel berücksichtigt werden können (Pickup and Delivery Problem with Transfers, PDPT), wird in [42] präsentiert. Hierbei werden die sogenannten Transfer Nodes als Objekte modelliert, die einerseits das Aussteigen (Entladen), wie an Zielpunkten und andererseits das Einsteigen (Beladen), wie an Abholpunkten, ermöglichen. Dabei ist allerdings sowohl die Anzahl als auch die Position der Transferpunkte definiert und die Fahrgäste müssen eine entsprechende Wartezeit an den Transferstellen in Kauf nehmen. Anhand initialer Tests mit 3 bis 6 Anfragen, 2 Fahrzeugen und einem Transferpunkt schließen die Autoren, dass die Einführung von Transferpunkten bei hohem Bedarf ein entsprechendes Einsparungspotenzial bieten könnte.

System	zentrale Anfrage	zentrale Routeplanung	dynamische Anfragen	dynamische/ statische Transferpunkte	große Instanzen
Telebus Berlin [22]	+	+	-	-/-	0
DRT Kopenhagen [153]	+	+	+	-/-	-
DRT for Large Towns [293, 174]	+	+	+	-/-	-
Demand Bus Shanghai [149]	+	-	+	-/-	k.A.
Dynamic Dispatching and Transport [57]	+/-	+	-	-/-	k.A.
College Park DRT [154]	+	+	+	-/-	-
PDPT San Francisco [162]	+	+	-	-/+	0
PDPT [42]	+	+	+	-/+	k.A.

Legende: + erfüllt, - nicht erfüllt, 0 teilweise erfüllt, k.A. keine Angabe, *) geplante Funktionalität

Tabelle 3.4: Systeme und Anwendungen für den bedarfsorientierten Transport

Wie aus Tabelle 3.4 ersichtlich, wird bei den vorgestellten Systemen eine Transportanfrage an eine zentrale Instanz gestellt, die in der Regel für die Zuordnung zu den jeweiligen Fahrzeugen zuständig ist. In diesem Zusammenhang erfolgt auch die eigentliche Routenplanung und deren Optimierung unter Berücksichtigung entsprechender Einschränkungen in fast allen Fällen zentral. Die Forschung der letzten Jahre konzentrierte sich hierbei auf die Entwicklung und Verbesserung von Verfahren zur Lösung der entsprechenden Problemstellungen mit dem Ziel große Instanzen möglichst optimal zu bewältigen. Hierbei stellen dynamische Anfragen, die bei einer Planung im Vorfeld nicht berücksichtigt werden können, eine zusätzliche Herausforderung dar. Lediglich vereinzelte Arbeiten beschäftigten sich bisher mit Ansätzen, die sich mit der Möglichkeit von Fahrzeugwechseln zur Optimierung beschäftigten. Dabei ist bei den bisherigen Verfahren einerseits die Anzahl der möglichen Transferpunkte beschränkt und andererseits handelt es sich um festgelegte oder statische Punkte. Zudem muss von den potenziellen Fahrgästen an den Transferstellen gegebenenfalls eine zusätzliche Wartezeit in Kauf genommen werden, bis diese von einem anderen Fahrzeug abgeholt werden.

3.4 Umweltüberwachung

Die Überwachung der Umweltbedingungen bezieht sich zum einen auf Wetterinformationen, die den Verkehr und die Sicherheit beeinflussen können, wie beispielsweise Regen, Schnee oder Glatteis und zum anderen auf Emissionen, die die Luftqualität beeinflussen und unter anderem vom Verkehr verursacht werden, wie CO_2 , NO_x oder Feinstaub. Bezüglich der vom Verkehr verursachten Umwelteinflüsse und je nach Betrachtungsweise können aber auch der Lärm und der Platzbedarf für die notwendige Infrastruktur eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit der Umwelt spielen. Im Folgenden werden Arbeiten und Systeme vorgestellt, die sich mit der Überwachung von Emissionen und der Gewinnung und Verwaltung entsprechender Messwerte beschäftigen.

3.4.1 Überwachung von Umweltbedingungen

Im Zuge des bevorstehenden Klimawandels, für den maßgeblich die Emission von Schadstoffen und Treibhausgasen verantwortlich gemacht werden, haben Anwendungen und Systeme zur Überwachung und Verwaltung von Umweltinformationen immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dies wird auch durch die größere Verfügbarkeit umweltrelevanter Informationen deutlich, die beispielsweise über das von der Europäischen Union in den Projekten CITEAIR und CITEAIR II [192] entstandene Portal Air Quality in Europe [178] abgerufen werden können. Einen weiteren Betrag leistet hierbei die Entwicklung im Bereich mobiler Sensoren zur Erfassung von Umweltdaten, da hierdurch entsprechende Informationen ubiquitär verfügbar sind und eine sinnvolle Ergänzung zu den vorhandenen, statischen Messstationen darstellen.

BikeNet [71] ist eine Sensorplattform, bei der Umweltdaten über an Fahrrädern befestigte Sensoren erfasst werden. Dabei besteht die Möglichkeit die gemessenen Daten entweder zwischenspeichern und zu einem späteren Zeitpunkt an die Plattform zu übertragen oder die Messwerte werden in Echtzeit über so genannte Service Access Points (SAP) übermittelt. Bei den statischen SAPs handelt es sich um modifizierte WLAN Access Points, die über das Internet mit dem BikeNet Backend-System verbunden sind. Ein mobiler SAP wurde im Rahmen der Arbeit durch ein Nokia N80 realisiert und erlaubt eine Verbindung zum Backend-System unabhängig vom aktuellen Standort. Mit Hilfe unterschiedlicher Sensoren, die über IEEE 802.15.4 miteinander in einem Bike Area Network (BAN) verbunden sind, werden sowohl Daten über die Fahrleistung und den Zustand des Fahrers sowie über die Umwelt entlang der Strecke gesammelt. Die erfassten Daten werden in einer zentralen Datenbank gespeichert und können von den jeweiligen Benutzern über einen webbasierten Dienst abgerufen und betrachtet werden. Bezüglich der Datenanalyse und -verarbeitung werden Techniken zur Interpolation, Mittelwertberechnung und Glättung angeboten.

CarTel [114] ist ein verteiltes System zur Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung von Sensordaten. Ein CarTel Node ist dabei mit unterschiedlichen Sensoren verbunden und verarbeitet die Sensormesswerte lokal, bevor diese zu einem zentralen Portal übermittelt werden. Auf der Serverseite werden die Messwerte in einer Datenbank zur weiteren Analyse

und Visualisierung gespeichert. Der Server ist dabei die zentrale Komponente und stellt CarTel Anwendungen und Funktionen zur Verfügung. Zur Konfiguration und Erzeugung von Anfragen an die Sensorknoten verwendet das System eine auf SQL basierende ICEDB. Das Datenmodell wird mit Hilfe von Metadaten beschrieben und erlaubt die Integration unterschiedlicher Sensortypen sowie die Erzeugung der entsprechenden Datenbanktabellen. Über CafNet, ein nachrichtenbasiertes Kommunikationsprotokoll, können Informationen in beide Richtungen ausgetauscht werden. Die Anwendungen nutzen diese Komponenten um entweder auf die Datenbank zuzugreifen oder um kontinuierliche Anfragen an die Sensoren zu spezifizieren. Sofern Positionsdaten, beispielsweise mittels GPS, vorhanden sind, können die zugehörigen Werte mit Hilfe von räumlichen Suchanfragen gefunden werden. Da die einzelnen Sensoren eindeutig identifizierbar sind, können die Benutzer lediglich auf die von ihnen erfassten Daten zugreifen, um so die Privatsphäre zu gewährleisten. Der Fokus der Arbeit lag auf der Erfassung von Fahrzeiten, städtischen WLAN Hotspots und Fahrzeugdaten. Allerdings ist durch eine Erweiterung mit entsprechenden Sensoren auch die Erfassung von Umweltinformationen möglich.

In [89] wird ein System zur Überwachung der Luftverschmutzung basierend auf dem Discovery Net [47] vorgestellt. Die statischen Sensoren werden dabei in Form einer Gitterstruktur ausgebracht und sind in der Lage, Messungen in vergleichsweise kurzen Abständen von 2 Sekunden durchzuführen. Die auf diese Weise gewonnenen Daten werden zentral in einer SQL Datenbank gespeichert und zunächst bereinigt bevor die weitergehende Analyse und Visualisierung durchgeführt wird. Dabei müssen fehlende Daten entweder deutlich gekennzeichnet oder basierend auf einem Interpolationsverfahren ergänzt werden. Das eingesetzte lineare Interpolationsverfahren verwendet zu diesem Zweck die benachbarten Messwerte oder begrenzende Extramwerte. Für die Visualisierung der Informationen kommen Vektorkarten zum Einsatz, wobei mit Hilfe entsprechender Metadaten auch Anfragen von Gebäudenamen oder -typen unterstützt werden.

In [32] wird MetroSense vorgestellt, wobei es sich um ein skalierbares Sensorsystem handelt, welches auf einer opportunistischen Erfassungs- und Kommunikationsinfrastruktur basiert. Die vorgeschlagene Architektur setzt sich aus einer physikalischen Ebene und einer Softwareebene zusammen. Die physikalische Ebene besteht aus stationären und mobilen Sensoren sowie den so genannten Sensor Access Points. Ein Sensor Access Point dient den in der Nähe befindlichen Sensoren als Gateway, über das einerseits Daten an die Softwareebene übermittelt und andererseits Anfragen von dieser ausgeführt werden können. Zusätzlich wird über direkt angeschlossene Sensoren eine Grundwahrheit abgeleitet, die wiederum zur Validierung eingehender Messwerte in anderer Sensoren herangezogen werden kann. Die Softwareebene besteht aus den Core Components für Zugriffskontrolle, Synchronisation, Lokalisierung sowie einem Archiv über den Systemstatus. Die Common Components sind für die Namensauflösung, Datenspeicherung, Verarbeitung und Analyse der Daten verantwortlich. Unter Verwendung einer Simulation auf dem Gebiet des Dartmouth Campus (ca. 1,6 km²) wurde der vorgeschlagene Ansatz mit einem System aus rein stationären Sensoren bezüglich der Abdeckung und benötigten Sensoranzahl verglichen. Dabei konnte unter anderem gezeigt werden, dass für eine Abdeckung von 53% in einem Zeitraum von 20 Minuten anstelle von

15000 stationären Sensoren lediglich 750 Sensor Access Points und 3750 mobile Sensoren ausreichen würden.

CitySense [170, 18] ist ein Projekt, dessen Fokus auf einer stadtweiten Implementierung einer skalierbaren Mesh Netzwerk Infrastruktur liegt. Dabei werden an die einzelnen Knoten Umweltsensoren zur Erfassung von Schadstoffkonzentration, Luftfeuchtigkeit, -druck oder Temperatur angeschlossen. Bei den Netzwerkknoten handelt es sich um verhältnismäßig leistungsstarke Kommunikationscomputer (Soekris net4826), die in der Lage sind neben den eigentlichen Messungen auch entsprechende Vorberechnungen durchzuführen. Dabei ist durch die Positionierung an Straßenlaternen und auf Hausdächern auch die Stromversorgung gewährleistet. Die Messwerte werden in einem XML Format an einen zentralen Server übermittelt und dort in einer Datenbank gespeichert. Anschließend können diese Informationen für auf Echtzeit basierende Anwendungen verwendet werden. Neben den Sensor- bzw. Netzwerkknoten existieren auch Gatewayknoten, die eine Anbindung des Mesh Netzwerkes an das Internet und somit die Kommunikation mit dem Server ermöglichen. Neben der Speicherung der Daten übernimmt der Server auch Aufgaben bezüglich der Verwaltung und Überwachung einzelner Konten.

In [169] wird ein drahtloses Sensornetzwerk zur Umweltüberwachung vorgestellt, welches sich aus drei Schichten, der Sensorschicht, der Serverschicht und der Clientschicht zusammensetzt. Die Sensorschicht ist für die Organisation und Verwaltung der Mesh Netzwerkstruktur verantwortlich und führt in periodischen Abständen von 3 Minuten Messungen durch, die an einem Gateway zwischengespeichert und schließlich an die Serverschicht übermittelt werden. In der Serverschicht werden die Messwerte in einer SQL Datenbank gespeichert. In Abständen von 15 Minuten werden die dort gespeicherten Daten von einem speziellen Modul zu einem Durchschnittswert aggregiert und einer Komponente zur Erzeugung von Diagrammen zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz zu ereignisbasierten Systemen, die eine globale Uhr voraussetzen, werden die empfangen Messwerte serverseitig anhand des Messzeitpunktes sortiert und den Intervallen zugeordnet.

Die IVU Umwelt GmbH hat das Monitoring System IMMIS [120] zur stadtweiten Überwachung der Luftschadstoff- und Lärmbelastung entwickelt. Das System ist modular aufgebaut und nutzt neben Verkehrsdaten und Emissionskatastern auch punktuelle Schadstoffmesswerte stationärer Messstationen sowie Wetterdaten. Die notwendigen, verkehrsrelevanten Eingangsdaten bestehen zum Großteil aus statistischen Werten für die einzelnen Straßenabschnitte, wie beispielsweise dem mittleren Verkehr oder dem Anteil an schweren Nutzfahrzeugen. Anschließend wird basierend auf unterschiedlichen Modellen und unter Berücksichtigung aktueller Messwerte die Umweltsituation berechnet. Mit Hilfe einer entsprechenden Komponente lassen sich die berechneten Werte bezüglich der Luftqualität oder der Lärmbelastung zusätzlich visualisieren.

Die vorgestellten Systeme sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst, wobei diese in der Regel auf eine weiterführende und gemeinschaftliche Nutzung der erfassten Daten ausgelegt sind. Im Zusammenhang mit der Erfassung von Umweltinformationen werden kollaborative Ansätze bisher nicht berücksichtigt, obwohl diese beispielsweise mit Hilfe entsprechend ausgestatteter Smartphones realisierbar sind. Der Fokus liegt bisher auf dem Einsatz

System	kollaborative Erfassung / Nutzung	mobile Sensoren	Skalierbarkeit	Echtzeit- fähigkeit	Visualisierung
BikeNet [71]	-/-	+	+	-	+
CarTel [114]	-/-	+	+	k.A.	+
Discovery Net [89]	-/+	-	k.A.	+	+
MetroSense [32]	-/+	+	+	+	k.A.
CitySense [170, 18]	-/+	-	+	-	+
green WSN [169]	-/+	-	k.A.	+	+
IMMIS [120]	-/+	-	+	+	+

Legende: + erfüllt, - nicht erfüllt, 0 teilweise erfüllt, k.A. keine Angabe

Tabelle 3.5: Systeme zur (kollaborativen) Umweltüberwachung

klassischer drahtloser Sensornetzwerke die sich sowohl aus stationären als auch aus mobilen Sensoren zusammensetzten und in der Regel eine hohe Skalierbarkeit gewährleisten. Für eine flächendeckende Erfassung müssen die einzelnen Sensoren in dem jeweiligen Gebiet ausgebracht und gegebenenfalls gewartet werden. Die effiziente Umsetzung entsprechender Anfragen ermöglicht dabei in der Regel echtzeitfähige Weiterverarbeitung und Aufbereitung der erfassten Umweltdaten.

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst verwandte Arbeiten aus dem ITS Bereich der Reiseinformationen vorgestellt. Der Fokus lag auf mobilen Anwendungen, die den Benutzern Informationen bezüglich der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel zur Verfügung stellen. Vergleichbar mit ortbezogenen Diensten (englisch: Location based Services, LBS) verwenden entsprechende Systeme die Positionsdaten von Benutzern und Fahrzeugen, um Informationen über die in der Nähe befindlichen Haltestellen sowie die aktuellen Abfahrtszeiten bereitzustellen. Zu diesem Zweck kamen bisher serverbasierte Systeme zum Einsatz, die neben der Pre-Trip Planung teilweise auch eine dynamische Aktualisierung während der Fahrt ermöglichen. Eine lokale Planung der Route und deren Aktualisierung im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr inklusive der Streckenabschnitte, die zu Fuß zurückgelegt werden, wurde bisher vernachlässigt.

Im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr wurden anschließend Systeme behandelt, welche die Bildung von Fahrgemeinschaften unterstützen. Auch hierbei standen zentrale Ansätze und Systeme im Vordergrund, die im Wesentlichen als Vermittler zwischen Angeboten und Gesuchen fungieren. Im Gegensatz zu den zentralen Varianten existieren bereits erste Ansätze, die unter Verwendung der lokalen Kommunikation insbesondere für den Einsatz bei spontanen oder dynamischen Fahrten gedacht sind. Allerdings stand hierbei in der Regel die Kommunikationsreichweite und deren Einfluss auf die Fahrzeit im Vordergrund. Sofern kein fester Treffpunkt im Vorfeld vereinbart wurde, kann das Ausfindigmachen potenzieller Mitfahrer durch die Integration einer lokalen Positionsaktualisierung unterstützt werden.

Im Rahmen des ITS Bereichs Verkehrsmanagement, wurden im weiteren Verlauf einige Arbeiten vorgestellt, die sich mit einer effizienteren und intelligenteren Nutzung

des städtischen Parkraumes auseinandergesetzt haben. Dabei erfolgt die Erfassung freier Parkplätze in der Regel mit Hilfe von stationären Sensoren, wie Kameras, Drucksensoren oder Abstandssensoren. Der Einsatz mobiler Sensoren beschränkt sich dabei auf den Einsatz von Fahrzeugen, die mittels geeigneter Sensoren mögliche Parkplätze am Straßenrand automatisch identifizieren. Die Aktualität der Daten und das Abdeckungsgebiet hängt dabei maßgeblich von den Routen und der Anzahl entsprechender Fahrzeuge ab. Eine automatische aber von einer Infrastruktur unabhängigen Erkennung der eigentlichen Parkvorgänge mit Hilfe moderner Smartphones und basierend auf den lokal verfügbaren Informationen wurde nicht betrachtet.

Anschließend wurden Systeme für den bedarfsorientierten Transport aus dem ITS Bereich des öffentlichen Verkehrs behandelt. Ein Großteil dieser Systeme konzentriert sich auf die Transportanforderungen besonderer Personengruppen, wie beispielsweise älterer oder behinderter Menschen. Die Forschung beschäftigte sich in den letzten Jahren überwiegend mit Optimierungsansätzen und Heuristiken zur Lösung des DARPs, wobei es sich um eine Unterklasse des TSP handelt. Das Ziel liegt auf einer besseren Skalierbarkeit, wodurch optimale Lösungen für größere Instanzen in kurzer Zeit berechnet werden können. Eine zusätzliche Herausforderung ist die Berücksichtigung dynamischer Anfragen. Ein bisher kaum beachteter Ansatz zur Optimierung und Verbesserung der Skalierbarkeit besteht in der Einführung von Fahrzeugwechseln. Die vorgestellten Arbeiten konzentrierten sich allerdings auf wenige festgelegte Positionen, wobei gegebenenfalls zusätzliche Wartezeiten in Kauf genommen werden müssen. Eine dynamische Vereinbarung beliebiger Punkte für den Transfer, die zudem eine Reduzierung der Wartezeit für den Fahrzeugwechsel ermöglicht, wurde bisher nicht untersucht.

Als letztes wurden einige Systeme und Ansätze zur Erfassung und Verarbeitung von Umweltinformationen vorgestellt, die sich auf den entsprechenden ITS Bereich beziehen. Dabei kamen bisher im Wesentlichen stationäre oder batteriebetriebene mobile Sensoren auf der Basis von drahtlosen Sensornetzwerken zum Einsatz. Die effiziente Verbreitung, Verwaltung und Organisation der einzelnen Sensorknoten erfordert zwar einen entsprechenden Aufwand, wobei dennoch eine Echtzeitfähigkeit erreicht wird. Möglichkeiten zur Integration von Smartphones mit eingebauten Sensoren zur gemeinschaftlichen Erfassung von Umweltinformationen wurden bisher nicht berücksichtigt. Im Vergleich zu klassischen Sensornetzen kann dabei allerdings die Abdeckung starken Schwankungen unterliegen, denen mit Hilfe geeigneter Verfahren Rechnung getragen werden muss.

Das nächste Kapitel befasst sich mit den wesentlichen Grundlagen für kooperative Mobilität. Dabei werden die Punkte: drahtlose Kommunikation, Verwaltung geografischer Informationen, Routen- bzw. Tourenplanung und geostatistische Verfahren genauer betrachtet. Im Zusammenhang mit der Tourenplanung wird dabei ein eigener kooperativer Ansatz vorgestellt.

GRUNDLAGEN KOOPERATIVER MOBILITÄT

Kooperative Mobilität basiert im Wesentlichen auf dem Austausch von Informationen, weshalb zunächst gängige Kommunikationstechnologien und grundlegende Modelle zur Dienstnutzung erläutert werden. Der Einsatz mobiler Endgeräte und die Verwendung georeferenzierter Daten erfordert geeignete Speicherstrukturen, auf die im Anschluss eingegangen wird, um einerseits eine effiziente Verwaltung der Daten zu gewährleisten und andererseits die beschränkten Ressourcen entsprechender Endgeräte zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Mobilität werden sowohl für den kollektiven als auch für den gemeinschaftlichen und bedarfsorientierten Transport geeignete Methoden zur Routen- bzw. Tourenplanung benötigt und sind für die Navigation unerlässlich. Daher befasst sich der dritte Abschnitt mit Ansätzen zur Lösung von Routen- und Tourenplanungsproblemen sowie den entsprechenden Voraussetzungen. Zusätzlich wird ein eigenes kooperatives Verfahren zur Tourenplanung in hoch dynamischen Umgebungen vorgestellt und die grundlegende Funktionsweise erläutert. Da bei der gemeinschaftlichen Erfassung von Umweltdaten und deren Nutzung eine entsprechende Fragmentierung der Daten zu erwarten ist und damit zwar zahlreiche, aber eben nicht lückendeckende Informationen vorliegen, werden für deren Aufbereitung robuste Verfahren zur Berechnung, Schätzung und gegebenenfalls auch zur Glättung benötigt. Auf die hierfür notwendigen Grundlagen in Form von geostatistischen Verfahren wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels eingegangen.

4.1 Drahtlose Kommunikation

Der Trend bezüglich der Kommunikation geht dahin, zu jeder Zeit und an jedem Ort Informationen abrufen und austauschen zu können. Für eine Kooperation oder auch Kollaboration ist der Austausch von Informationen essentiell, wobei die Kommunikation in diesem Zusammenhang als eine Technologie verstanden wird, mit deren Hilfe Nachrichten und Daten zwischen den beteiligten Entitäten ausgetauscht werden können. Hierfür können abhängig von der eingesetzten Technologie unterschiedliche Übertragungsmedien genutzt werden, wobei sich diese Arbeit vorrangig mit der drahtlosen Kommunikation befasst. Im Folgenden werden daher Technologien zur drahtlosen Kommunikation vorgestellt, die sich auf die unteren Schichten des OSI Referenzmodells beziehen. Eine Abstraktion dieses Modells ist das TCP/IP Referenzmodell [100] (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) und stellt eine Spezialisierung für Internetarchitekturen dar. Dabei sind die unteren beiden Schichten

in der Netzanschlussschicht zusammengefasst. Die Vermittlungs- und Transportschicht, die aus dem OSI Referenzmodell übernommen werden, sind für die logische Verbindung im Netz, die Wegewahl (englisch: Routing) und den netzwerkunabhängigen Ende-zu-Ende Transport zwischen zwei Geräten basierend auf dem Internet Protokoll zuständig. Über der Transportschicht befindet sich die eigentliche Anwendungs- oder Internetschicht, die sich aus spezifischen Protokollen zusammensetzt mit deren Verwendung Anwendungsprogramme eine IP basierte Kommunikation für den Austausch von Daten nutzen können. Neben den grundlegenden Technologien werden im Anschluss zwei Modelle zur verteilten Kommunikation vorgestellt, die eine Dienstrnutzung auf der Anwendungsebene ermöglichen.

4.1.1 Technologien zur drahtlosen Kommunikation

Mit Bezug auf die unteren Schichten des OSI Referenzmodells kann zunächst zwischen infrastrukturbasierten Netzwerken und Ad hoc Netzwerken differenziert werden, die zur Kommunikation und für den Austausch von Informationen genutzt werden. Diese unterscheiden sich neben der benötigten Infrastruktur, der daraus resultierenden Netzwerktopologie und den entsprechenden Routingstrategien durch das Abdeckungsgebiet, den Datendurchsatz und die Latenzzeiten.

4.1.1.1 Infrastrukturbasierte Netzwerke

Die infrastrukturbasierten Netzwerke benötigen feste Zugangspunkte (englisch: Access Point, AP) oder Basisstationen sowohl für den Kommunikationsaufbau als auch für den eigentlichen Datenaustausch. Die APs fungieren dabei als Schnittstelle zwischen den angebundenen mobilen Geräten und gegebenenfalls einem fest installierten drahtgebundenen Kommunikationsnetz. Die APs ermöglichen hierbei die drahtlose Anbindung, wobei über das daran angeschlossene Netzwerk Dienste zur Namensauflösung, Weiterleitung von Daten und Authentifizierung bereit gestellt werden und sind damit von der Funktionsweise mit Routern vergleichbar. Heutige Mobilfunknetze sind Beispiele für infrastrukturbasierte Netzwerke, wobei im Zusammenhang mit dieser Arbeit die IP basierte Kommunikation und der dadurch ermöglichte Austausch von Daten im Vordergrund steht. Mobilfunknetze eignen sich auf Grund der hohen Verfügbarkeit und nahezu flächendeckenden Abdeckung für Anwendungen und Dienste.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick der aktuellen Mobilfunktechnologien, wobei für die detaillierte Funktionsweise, die notwendige Infrastruktur und deren Aufbau auf [280, 286] verwiesen wird und im Folgenden die Standards der 2. bis 4. Generation bezüglich der eingangs erwähnten Aspekte verglichen werden.

Global System for Mobile Communications (GSM), General Packet Radio Service (GPRS)

Das globale System für mobile Kommunikation (früher: Groupe Spécial Mobile) ist ein Standard, entwickelt von ETSI, zur Beschreibung von Protokollen für die 2. Generation (2G) zellularer Netze. Hierbei stand hauptsächlich die Telefonie im Vordergrund, wobei mit der Einführung des GPRS und Enhanced Data Rates für GSM (EDGE) zunächst eine leitungsvermittelte, und später auch eine paketvermittelte Datenübertragung genutzt werden

konnte. Die weitere Standardisierung wurde mittlerweile von dem 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [175] übernommen, wobei diverse Erweiterungen, wie Evolved EDGE, unter anderem schnellere Übertragungsraten und geringere Latenzzeiten ermöglichten [214]. Im Fall von GSM besteht das Netzwerk aus dem GSM EDGE Radio Access Network (GERAN) und dem Core Network. Das GERAN beinhaltet Base Transceiver Stations (BTS), die zur Kommunikation mit den mobilen Endgeräten sowie deren Anbindung verwendet werden und Base Station Controllern (BSC), die mehrere BTS verwalten. Die BSCs sind mit dem eigentlichen Core Network bzw. dem Mobile Switching Center für Sprachübertragung oder dem Serving GPRS Support Node (SGSN) für die Datenübertragung verbunden. Die Reichweite bei der Kommunikation zwischen dem Mobilten Endgerät und der Base Transceiver Station (BTS), oder dem AP, hängt dabei stark von den Umfeldbedingungen, wie der Bebauung oder dem Geländeprofil, ab und beträgt unter Idealbedingungen bis zu 35 km. Die Zellgröße in urbanen Regionen ist wesentlich geringer, wobei die Datenübertragung in diesen Gebieten flächendeckend möglich ist. Die Latenzzeiten liegen bei Evolved EDGE nach Informationen der 3G Americas Member Companies und nach [190] zwischen 100 und 150 ms, was eine deutliche Verbesserung von über 500 ms im Vergleich zu dem initial eingeführten GPRS darstellt. Die für den Benutzer erreichbaren Datenraten belaufen sich auf mittlerweile auf über 1 MBit/s [214].

Universal Mobile Telephone System (UMTS)

Mit UMTS wird die 3. Generation des Mobilfunkstandards bezeichnet, wobei im Vergleich zum GPRS deutlich höhere Datenübertragungsraten erreicht werden können. Die Infrastruktur unterteilt sich in das Radio Access Netzwerk (UMTS Terrestrial Radio Access Network, UTRAN) bestehend aus neuen Basisstationen, die als NodeB bezeichnet werden, und in das Core Network (Mobile Application Part, MAP), welches für die Weiterleitung der Daten verantwortlich ist. Die Schnittstelle zwischen diesen Netzwerken wird von einem Radio Network Controller (RNC) gebildet, der einerseits für die Verwaltung der angeschlossenen NodeBs zuständig ist und andererseits über den Media Gateway (MGW) mit dem leitungsvermittelten und über den SGSN mit dem paketvermittelten Core Network verbunden ist. Zusätzlich gibt es bei UMTS Netzwerken unterschiedliche Zelltypen, wobei Picozellen einen Durchmesser von unter 100 Metern haben, Picozellen Gebiete der Größe einzelner Büros, eines Flughafens oder eines Messegeländes abdecken und Microzellen mit mehreren Kilometern Reichweite kleinere Städte versorgen können. Macrozellen haben eine Reichweite von über 20 km und die Ausdehnung so genannter Weltzellen reicht über mehrere hundert Kilometer. Auch bei diesem Standard wurden im Laufe der Zeit einige Verbesserungen umgesetzt, die unter anderem wieder auf eine effizientere Nutzung der Ressourcen abzielen und dadurch höhere Datenraten und geringere Latenzzeiten ermöglichen. Die Datenraten erreichen bei HSPA+ Spitzen von 42 MBit/s, wobei die typische Datenrate für den Benutzer zwischen 4 und 18 MBit/s liegt [223]. Die zu erwartenden Latenzzeiten bewegen sich mit rund 50 ms deutlich unter denen des GSM Standards.

Long Term Evolution (LTE)

Die 4. Generation von Mobilfunknetzen wird durch den 3GPP LTE Standard spezifiziert, wobei die Steigerung der Kapazität und Datenraten durch den Einsatz einer vollständig neuen Funkschnittstellentechnik erreicht wird [142]. Die Weiterentwicklung des Radio Access Networks wird mit Evolved UTRAN (E-UTRAN) bezeichnet, wobei sich dieses ausschließlich aus eNodeBs besteht. Dabei erfüllt ein eNodeB die gleichen Aufgaben wie NodeB und RNC beim UTRAN und sind über eine Schnittstelle untereinander sowie mit einer weiteren Schnittstelle mit dem paketvermittelten Core Network verbunden. LTE Advanced ist die bisher jüngste Erweiterung und wurde im März 2011 von dem 3GPP standardisiert, wobei die ersten kommerziellen Anwendungen in 2013 erwartet werden [142] [163]. Basierend auf der neuen Struktur kann einerseits ein geobasiertes Routing erfolgen, bei dem Teilnehmer über einen räumlich beschränkten Multicast innerhalb eines bestimmten Gebiets erreicht werden können [48]. Andererseits wird eine Direct-to-Direct Kommunikation unterstützt, mit der ein direkter Informationsaustausch zwischen einzelnen Endgeräten möglich ist [58]. Das Abdeckungsgebiet eines eNodeB reicht dabei von mehreren 10 Metern bei Femto- oder Picozellen bis zu 100 km bei Macrozellen. Zusätzlich wird im Hinblick auf die Bewegung mobiler Endgeräte je nach Zellgröße eine höhere Geschwindigkeit von bis zu 350 bzw. 500 km/h unterstützt. Die geringe Latenzzeiten von rund 10 ms prädestiniert LTE für den Einsatz im Bereich der Verkehrstelematik, wobei theoretisch eine Datenrate von 300 MBit/s möglich ist. Bei LTE Advanced können in Zukunft auch Datenraten von über 1 GBit/s erreicht werden [223].

Eine häufig im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr genutzte Technologie stellen so genannte Betriebs- und Bündelfunksysteme dar. Auch hierbei handelt es sich um zellulare infrastrukturbasierte Netzwerke, die allerdings eine nichtöffentliche Charakteristik aufweisen und deren Einsatz in der Regel auf eine bestimmte Region beschränkt ist [1].

Terrestrial Trunked Radio (TETRA)

Die erste Version von TETRA wurde 1995 von ETSI standardisiert und wurde speziell für die Nutzung durch staatliche Behörden, Rettungsdienste, Zugpersonal, Transportdienste und das Militär entwickelt. Der Aufbau ist vergleichbar mit anderen infrastrukturbasierten Mobilfunknetzen und nutzt Basisstationen als Zugangspunkte zur so genannten Switching und Management Infrastruktur (SwMI). Neben der Kommunikation über die Infrastruktur, der Trunked Mode Operation (TMO), unterstützen die mobilen Geräte auch die direkte Kommunikation untereinander in Form der Direct Mode Operation (DMO). Zusätzlich besteht die Möglichkeit TETRA Geräte als DMO Gateways zu verwenden, um die Kommunikation in Gebieten mit schlechter Netzabdeckung zu gewährleisten [76]. Neben unterschiedlichen Optionen zur Sprachübertragung bietet der Short Data Service (SDS) einerseits die leitungs- oder paketvermittelte Kommunikation und andererseits die Möglichkeit zur Datenübertragung. Mit TETRA Release 2 werden für den TETRA Enhanced Data Service (TEDS) Datenraten von bis zu 691 kBit/s angegeben [76]. Die Latenzzeit liegt unter 250 ms, und der Standard ist auf Grund der Einsatzgebiete für Geschwindigkeiten von über 400 km/h ausgelegt. Nach der Spezifikation beträgt die Abdeckung einer Zelle in städtischen Gebieten bis zu 8 km bei mobilen und bis zu 11 km bei stationären Empfängern. Das Abdeckungsgebiet hängt dabei von der Anzahl der verwendeten Basisstation ab und ist daher mit den zuvor genannten

Technologien vergleichbar. Weitere mit dem TETRA Standard vergleichbare Technologien sind Tetrapol [250], Digital Mobile Radio [199] und APCO Project 25 [180], wobei für eine detaillierte Beschreibung auf die entsprechende Literatur verwiesen wird.

4.1.1.2 Ad hoc Netzwerke

Im Gegensatz zu den infrastrukturbasierten Netzwerken wird für den Aufbau und die Kommunikation über ein Ad hoc Netzwerk keine Infrastruktur benötigt. Dies bedeutet zwar einen entsprechenden Verwaltungsmehraufwand für die einzelnen Geräte, aber diese sind nicht von einer Infrastruktur abhängig und erlauben eine direkte, spontane und kurzzeitige Verbindungen über die Daten ausgetauscht werden können [167]. Im Zusammenhang mit verkehrsrelevanten Anwendungen werden daher Technologien vorgestellt, die auf dem Wireless Local Area Network (WLAN) basieren und auch als Mobile Ad hoc Networks (MANET) oder mit der Einschränkung auf Fahrzeuge als Vehicular Ad hoc Networks (VANET) bezeichnet werden.

Mobile Ad hoc Netzwerke (MANET)

Ein MANET setzt sich aus mobilen Geräten zusammen, die mit drahtlosen Sende- und Empfangseinrichtungen ausgestattet sind und sich sowohl in ihrer physikalischen Umgebung als auch innerhalb der logischen Netzwerktopologie frei bewegen können. Die an einem MANET teilnehmenden Endgeräte werden als Knoten bezeichnet, die spontane Verbindungen zu anderen Knoten, abhängig von der Kommunikationsreichweite, aufbauen können. Hierbei beteiligen sich alle partizipierenden Knoten am Routing, indem Pakete zu anderen Knoten weitergeleitet werden. Dabei wird die Entscheidung, an welche Knoten das Paket weitergeleitet wird, dynamisch und basierend auf der Netzwerkverbindung getroffen. Neben der direkten Verbindung, die mit einem Hop (One-Hop) erreicht werden kann, besteht auch die Möglichkeit Nachrichten mit Hilfe von Multi-Hop Strategien in einem größeren Gebiet zu verteilen, sofern die einzelnen, weiterleitenden Knoten untereinander jeweils über einen Hop erreicht werden können. Die Kommunikation in Form des Nachrichtenaustauschs erfolgt entweder per Broadcast an alle umliegenden Knoten oder zielgerichtet an einen bestimmten Empfänger. WLAN stellt in diesem Zusammenhang eine mögliche Übertragungstechnologie dar und basiert auf einem der Standards aus der IEEE 802.11 [117] Protokollfamilie, die zurzeit aus 12 Normen besteht. Die gebräuchlichsten Varianten sind 802.11a/b/g/n, die sich neben dem Frequenzband (2,4 bzw. 5 GHz) auch in den verwendeten Modulations- bzw. Multiplexverfahren unterscheiden. Je nach Technologie können Nettodatenraten zwischen 1 und 300 MBit/s erreicht werden, wobei die Reichweite unter Idealbedingungen zwischen 100 und 250 Metern liegt [295]. Die Latenzzeiten der unterschiedlichen Standards beginnen bei 5 ms und liegen abhängig von der Anzahl der beteiligten Knoten auch im Sekundenbereich [34, 135]. Neben dem Ad hoc Modus können WLAN Netzwerke auch im Infrastruktur Modus betrieben werden, wobei die Kommunikation über einen AP stattfindet, der unter anderem für die IP Adressvergabe zuständig ist.

Vehicular Ad hoc Networks (VANET)

Bei einem VANET werden die Knoten durch Fahrzeuge repräsentiert, wobei die zugrunde liegende Technologie durch IEEE 802.11p spezifiziert ist und im Gegensatz zur herkömmlichen 802.11 Familie das 5.9 GHz Frequenzband oder Dedicated Short Range Communication (DSRC) genutzt wird. Dieser Standard ist speziell auf die Anforderungen einer zuverlässigen Kommunikation bei hoher Geschwindigkeit in dynamischen Umgebungen ausgelegt und eignet sich daher insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen, wie die Kollisionserkennung. Darauf baut die IEEE 1609 Protokollfamilie für Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) auf und beschreibt die Architektur, die Schnittstellen und Nachrichten zur Unterstützung und dem Betrieb einer sicheren, drahtlosen Verbindung zwischen Fahrzeugen oder zwischen Infrastruktur und Fahrzeug und richtet sich hauptsächlich an Anwendungen für ITS. In Europa wird IEEE 802.11p auch als Basis für ITS G5 verwendet, der von ETSI TC ITS standardisiert wird und unter anderem die Adressierung von Teilnehmern in einer bestimmten geografischen Umgebung, genannt Geonetworking [308], ermöglicht. Wie bei MANETs kann eine Vergrößerung der Kommunikationsreichweite durch Multi-Hop Strategien erzielt werden, so dass neben der reinen C2C Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen auch die C2I Kommunikation zur Interaktion mit der Infrastruktur über so genannte Road Side Units (RSU) erfolgen kann [263]. Mittlerweile ist im Bereich der Fahrzeugkommunikation der Einsatz unterschiedlicher Standards vorgesehen, wobei C2C zu den Ad hoc, C2I zu den infrastrukturbasierten und C2X zu den zellularen Technologien gezählt werden können. Daher wird ein Fahrzeug Ad hoc Netzwerk auch als Hybrid aus Ad hoc, infrastrukturbasierter und zellulärer Kommunikation bezeichnet. Die Datenrate von IEEE 802.11p ist im reinen Ad hoc Modus auf Werte zwischen 3 und 27 MBit/s beschränkt worden, wodurch eine theoretische Reichweite von bis zu 1000 Metern erreicht werden kann. Nach [52] wurden experimentell Kommunikationsreichweiten von 300 bis 700 Metern mit Geschwindigkeiten zwischen 170 und 300 km/h erreicht, wobei die Latenzzeiten im Mittel bei 1,5 ms lagen. Die verkehrsrelevanten Spezifikationen der genannten Technologien sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Basierend auf der Netzanschlussschicht ist die Vermittlungs- oder Internetschicht zuständig für die Weiterleitung von Paketen und die Wegewahl mit Hilfe entsprechender Routingstrategien. Hierbei findet vor allem das Internet Protokoll (IP) in der Version 4 oder 6 Anwendung und erlaubt die Umsetzung der physikalischen MAC Adresse. Auf dieser Schicht aufbauend stellt die Transportschicht die eigentlichen Ende-zu-Ende Verbindung her, wofür entweder das Transmission Control Protocol (TCP) für einen zuverlässigen, verbindungsorientierten und paketvermittelten Transport oder das verbindungslose User Datagram Protocol (UDP) eingesetzt wird. Bei reinen Ad hoc Netzwerken ist jedes Gerät selbst für die Vermittlung und den Transport zuständig und muss daher die entsprechenden Schichten implementieren. Im Gegensatz hierzu kann die entsprechende Funktionalität auch von der Infrastruktur bereitgestellt werden. In den nächsten Abschnitten, werden zwei Modelle zur IP basierten Dienstenutzung in verteilten Systemen vorgestellt, die auf der Anwendungsschicht anzusiedeln sind.

Technologie	Abeckung	Datenrate	Latenzzeit	Besonderheiten
Infrastrukturbasierte Netzwerke				
GSM/GPRS	ächendeckend	< 1,2 MBit/s	100 - 700 ms	-
UMTS	ächendeckend (innerstädtisch)	4 - 18 MBit/s (max. 42 MBit/s)	50 ms	-
LTE	ächendeckend (im Aufbau)	bis 300 MBit/s	10 ms	Geonetworking, hohe Geschwindigkeiten 350 - 500 km/h, direkte Kommunikation
Bündel- und Betriebsfunk				
TETRA Enhanced Data Service	ächendeckend	bis 691 kBit/s	< 250 ms	hohe Geschwindigkeiten über 400 km/h, direkte Kommunikation
Ad hoc Netzwerke				
MANET (WLAN)	100 -250 Meter	1 - 300 MBit/s	> 5 ms	-
VANET	300 - 700 Meter (max. 1000 Meter)	3 - 27 MBit/s	< 2 ms	Geonetworking, hohe Geschwindigkeiten bis 300 km/h

Tabelle 4.1: Vergleich gängiger Kommunikationstechnologien

4.1.2 Modelle verteilter Kommunikation

Bezüglich der Nutzung von Dienstleistungen und Anwendungen existieren in der computervermittelten Kommunikation zwei grundsätzliche Modelle, wie der notwendige Datenaustausch realisiert werden kann. Zum einen handelt es sich um das Client-Server Modell [72], bei dem die anfallenden Aufgaben in der Regel zentral von einem Server durchgeführt werden, der gegebenenfalls auch für eine entsprechende Verteilung zuständig ist und das Peer-to-Peer Modell [150], bei dem die Aufgaben im Zusammenhang mit der Dienstnutzung dezentral zwischen den Geräten aufgeteilt werden.

4.1.2.1 Client-Server Modell

Das Client-Server Modell beschreibt eine verteilte Anwendung, bei der Aufgaben über ein Netzwerk zwischen dem Anbieter, genannt Server, und dem anfragenden Client verteilt werden. Im eigentlichen Sinne ist ein Server ein Programm, das eine Dienst anbietet und die notwendigen Ressourcen einem oder mehreren Clients zur Verfügung stellt. Durch die permanente Bereitschaft ist der Server jederzeit in der Lage, auf eingehende Anfragen eines Clients zu reagieren. Standardaufgaben sind beispielsweise der Versand und Empfang von E-Mails, oder der Zugriff auf Webinhalte. Es kann sich allerdings auch um spezifische Aufgaben eines Programms handeln, wobei die Regeln der Kommunikation durch ein Protokoll festgelegt werden. Damit ist die Kommunikation, bei der Daten zwischen Client und Server ausgetauscht werden, abhängig vom Dienst und wird anhand eines entsprechenden Protokolls festgelegt.

4.1.2.2 Peer-to-Peer Modell

Das P2P Modell beschreibt eine verteilte Anwendung, bei der Aufgaben über ein Netzwerk zwischen gleichberechtigten Peers verteilt werden. In einem reinen P2P Netzwerk findet die Kommunikation unter Peers statt und beinhaltet sowohl die Bereitstellung als auch die Nutzung von Diensten. Bei den Peers handelt es sich in der Regel um eigenständige Computer, die in modernen P2P Netzen häufig anhand der Qualifikation in Gruppen aufgeteilt werden, die

wiederum spezifische Aufgaben übernehmen. Jedem Peer kann dabei zur Erledigung der Aufgaben jedem anderen Teilnehmer des P2P Netzes die Ressourcen direkt zur Verfügung stellen. Die Verwaltung und Organisation erfolgt dabei über ein Overlay Netzwerk, das das System unabhängig von der physikalischen Netzwerktopologie macht. Peer-to-Peer Netzwerke lassen sich in strukturierte und unstrukturierte P2P Netze unterteilen. In strukturierten P2P Netzen werden die Peers anhand spezifischer Kriterien und Algorithmen organisiert, was sich in einem Overlay mit entsprechenden Eigenschaften und einer spezifischen Topologie widerspiegelt. Typischerweise verwenden diese Systeme eine Indexierung, die auf verteilten Hashtabellen (englisch: distributed hash tables, DHT) basiert. Unstrukturierte P2P Netzwerke schreiben keine Struktur des Overlays vor, und die einzelnen Peers verbinden sich beliebig untereinander [291]. Da keine zentrale Komponente für die Verwaltung und Organisation zuständig ist, existiert keine feste Zuordnung zwischen Ressourcen und Peers, weshalb Anfragen an alle bekannten Peers versendet werden, was auch als flooding bezeichnet wird. Neben diesen reinen P2P Systemen, existieren auch zentralisierte P2P Systeme, bei denen ein zentraler Server für Verwaltung notwendig ist und hybride Ansätze, bei denen die Peers in Client-Peers und Overlay-Peers unterteilt werden. Die Rolle der einzelnen Peers kann sich dabei dynamisch ändern, wobei die Overlay-Peers einen zentralen Server oder Supernode repräsentieren und für die Koordination der P2P Struktur zuständig sind.

Der Vorteil von P2P Netzen liegt in dem einfacheren Kontrollkonzept, da einerseits keine zentrale Entität benötigt wird, die einer entsprechenden Verwaltung und Wartung bedarf und andererseits der Informationsaustausch nicht zwingend über diese erfolgen muss, sondern dezentral organisiert werden kann. Daher sind die initialen Kosten und der Verwaltungsaufwand geringer als bei Client-Server Systemen. Eine zentrale Struktur ermöglicht die Zusammenfassung von Diensten auf einem geeigneten Server und die Verwendung von Clients mit geringerer Performance. Allerdings verringern sich in diesem Fall bei jedem hinzukommenden Client die verfügbaren Ressourcen des Servers, was sich negativ auf die Skalierbarkeit auswirkt. Zusätzlich ist das gesamte Netzwerk betroffen, wenn der zentrale Server ausfällt oder die Kommunikationsverbindung zu diesem unterbrochen ist. Bei steigender Anzahl der Peers und bei steigenden Anfragen erhöht sich gleichzeitig die Kapazität des P2P Systems, da sich auch die zur Verfügung stehenden Ressourcen erhöhen. Gleichzeitig erhöht sich auch der Suchaufwand und der damit verbundene Kommunikationsoverhead. Allerdings hat der Ausfall einer Komponente in einem verteilten P2P Netz keine oder kaum Auswirkungen auf das übrige Netzwerk und ist dadurch robuster. Durch den Einsatz redundanter Server und den damit verbundenen Aufwand kann dies auch bei Client-Server Systemen erreicht werden.

4.2 Verwaltung geografischer Informationen

Im Zusammenhang mit Verkehrssystemen oder Transportsystemen gibt es einige Überschneidungen mit dem Bereich der Geoinformatik. Im Wesentlichen geht es dabei um raumbezogene Informationen oder Geoinformationen sowie deren Erfassung, Speicherung, Analyse,

Visualisierung und Verarbeitung. Diese Prozesse sind auch die Grundlage für Geoinformationssysteme (GIS). Die Überschneidungen beziehen sich auf die Anwendungsgebiete nach [70] zu denen unter anderem auch das integrierte Verkehrsmanagement, ortsbezogene Dienste und Geodatendienste gehören.

4.2.1 Geoinformationssysteme

Geoinformationssysteme arbeiten mit Geodaten, wobei es sich um digitale Informationen handelt, denen eine bestimmte räumliche Lage, beispielsweise mittels GPS Koordinaten, zugeordnet werden kann. Dabei sind die Metadaten, die den räumlichen Informationen zugeordnet werden, von besonderer Bedeutung, da diese eine weitergehende Beschreibung erlauben. Auf diese Weise können beispielsweise einer Bushaltestelle neben den Koordinaten weitere Informationen, wie das Vorhandensein einer Überdachung, einer Sitzmöglichkeit oder die bedienenden Buslinien zugeordnet werden. Neben einzelnen Punkten können auch komplexere Strukturen, wie ein Straßennetz oder ganze Städte beschrieben werden.

Kommerzielle Hersteller von GIS sind AutoCAD® Map 3D (Autodesk) [181], MicroStation (Bentley Systems) [221], ArcGIS (ESRI) [179] oder Mapinfo® (MapInfo Corporation) [219]. Öffentliche Stellen verwenden in der Regel speziell angepasste Systeme oder greifen auf Open-Source Produkte, wie GRASS GIS [212] oder Quantum GIS [242] zurück. Im Bereich der Online-GIS hat sich mittlerweile neben den bekannten Vertretern, wie Google Maps oder Bing Maps auch das Open-Source Projekt OpenStreetMap (OSM) etabliert [39, 184, 211]. Neben der reinen Kartendarstellung und der umfangreichen Nutzung des Application Programming Interface (API) ist hierbei auch ein Zugriff und die Nutzung der Rohdaten möglich. Bei OSM handelt es sich um ein gemeinschaftliches Projekt zur Erstellung einer freien Weltkarte in dessen Rahmen von der aktiven Gemeinschaft etliche Werkzeuge für die Verarbeitung, Nutzung und Visualisierung entwickelt und zur Verfügung gestellt werden. OSM nutzt eine topologische Datenstruktur, die aus vier Hauptelementen besteht: (1) Nodes oder Punkte, die als geografische Koordinaten in Form von Längen- und Breitengrad nach WGS 84 [171] vorliegen. (2) Ways sind geordnete Listen von Knoten, die Polylinien oder Polygone bilden. (3) Relations sind Gruppen aus Nodes, Ways oder anderen Relations, denen bestimmte Eigenschaften zugewiesen werden können. (4) Tags sind zusätzliche Metadaten, die zur Beschreibung der genannten Elemente verwendet werden.

Im Zusammenhang mit der Speicherung und Verwaltung großer Datenmengen bieten sich dafür geeignete Datenbankmanagementsysteme an, die geometrische Datentypen, wie Punkte, Linien(-segmente) und Polygone zusammen mit geometrischen Operatoren und Funktionen unterstützen. Diese werden allerdings (noch) nicht von OSM genutzt, da zunächst die reine Speicherung der Informationen im Vordergrund stand. Für die Speicherung dieser Geodaten verwendete OSM bis zur API Version 0.5 eine MySQL Datenbank [226]. Seit der Version 0.6 kommt hierfür das objekt-relationale Datenbanksystem PostgreSQL zum Einsatz, bei dem für jedes der vier Datenprimitive eine entsprechende Tabelle verwendet wird und das grundlegende geometrische Funktionen bereitstellt [240].

Die zuvor angesprochenen Datentypen, Operatoren und Funktionen, die auch über Erweiterungen, wie PostGIS [239] oder Oracle Spatial [235], bereitgestellt werden können,

erlauben die Nutzung und Verarbeitung von geografischen Objekten. Neben den Operationen zum Vergleich geografischer Objekte lassen sich auch komplexere Anfragen umsetzen. In Listing 4.1 ist ein Beispiel aufgeführt, mit dem die Länge von rund 12693 Metern der U-Bahn Linie 1 in München anhand der geometrischen Eigenschaften der Wegsegmente abgefragt werden kann. Die zweite Anfrage bestimmt die Kosten in Form der Länge von 408 Metern zwischen zwei Punkten in geografische Länge und Breite. Im zweiten Beispiel wird dabei die kürzeste Route basierend auf den OSM Daten mit Hilfe der Funktion `shortest_path_astar` berechnet. Weitere Verfahren zur Berechnung von kürzesten Wegen und deren Funktionsweisen werden in Abschnitt 4.3.1.1 in Verbindung mit der Routen- bzw. Tourenplanung behandelt. Für weitere Beschreibungen im Zusammenhang mit den Funktionen, die von PostGIS zur Verfügung gestellt werden, sei auf die entsprechende Dokumentation verwiesen.

Listing 4.1: PostGIS: Beispielanfragen mit geografischen Objekten

```
SELECT sum(length(geometry))
  FROM ways
  WHERE name LIKE '%U1%';
> 12693.5782162861

SELECT sum(cost)
  FROM shortest_path_astar('
    SELECT id, source, target, length(geometry) AS cost,
           x1, y1, x2, y2
    FROM ways',
    POINT(0.1209239 51.5451977),
    POINT(0.1188811 51.5474609),
    false, false);
> 408.665329604851
```

Zur Beschleunigung geometrischer Funktionen, insbesondere bei der Suche nach den nächsten Nachbarn und anderen Vergleichsoperationen, können Indexstrukturen angelegt werden. Bei PostgreSQL kann hierbei auf die Generalized Search Tree (GiST) Schnittstelle [102] zurückgegriffen werden, wobei es sich um eine Generalisierung von B+ Bäumen handelt und eine nebenläufige, wiederherstellbare Suchbauminfrastruktur zur Verfügung stellt. Die Indexstrukturen basieren dabei in der Regel auf Verfahren zur Raumteilung, wie dem Binary Space Partitioning oder dem Quadtree Verfahren, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

4.2.2 Verfahren zur hierarchischen Unterteilung von Räumen

Diese Verfahren werden verwendet, um geografische oder höherdimensionale Räume zu unterteilen und dadurch die Suche nach bestimmten Objekten zu beschleunigen. Im Vergleich zu einer sequenziellen Suche in einer Liste, bei der die Zeitkomplexität im schlechtesten Fall mit $O(n)$ angegeben werden kann, ermöglicht die Suche in einer balancierten Baumstruktur eine Reduzierung der Suche auf $O(\log n)$, wobei n der Anzahl der Elemente entspricht. Weitere mehrdimensionale Speichertechniken, wie R-Bäume, B-Bäume, Hashverfahren oder Grid-Files werden in [28] beschrieben.

Binary Space Partitioning (BSP)

Bei dem BSP handelt es sich ursprünglich um ein Verfahren aus der Computergrafik, wobei multidimensionale Daten durch eine Menge von Hyperebenen partitioniert werden. Die auf diese Weise erstellte Datenstruktur ist ein Binärbaum, der nach [86] als BSP Baum bezeichnet wird. Sie erlaubt den schnellen Zugriff auf räumliche Objekte in einer virtuellen Welt, die abhängig von der Reihenfolge und der Position bzw. Sicht des Betrachters dargestellt bzw. gerendert werden. Die inneren Knoten des BSP Baums sind Hyperebenen in einem d -dimensionalen Raum, wobei die Wurzel dem gesamten Raum (\mathbb{R}^d) entspricht. Sofern Kinder vorhanden sind, wird der Raum durch die in der Wurzel befindliche Hyperebene in zwei Halbräume unterteilt. Durch die rekursive Unterteilung enthält jeder Kindknoten, der nicht aus einem Blatt besteht, ebenfalls eine Hyperebene, mit der der jeweilige Halbraum unterteilt wird. Blätter des BSP Baumes, die zu keiner weiteren Unterteilung führen, werden als Zelle bezeichnet [305]. Die Hyperebene H eines inneren Knoten kann durch die Hyperebengleichung in Normalenform wie folgt beschrieben werden:

$$H = \{(x_1, \dots, x_d) \mid a_1x_1 + \dots + a_dx_d - b = 0\}$$

Dabei wird der Raum durch diese Hyperebene H in die zwei Halbräume H^+ und H^- unterteilt:

$$H^+ = \{(x_1, \dots, x_d) \mid a_1x_1 + \dots + a_dx_d - b > 0\}$$

$$H^- = \{(x_1, \dots, x_d) \mid a_1x_1 + \dots + a_dx_d - b < 0\}$$

Durch den Einsatz der Hyperebenen werden Objekte, die sich in dem Raum befinden, zwei unterschiedlichen Halbräumen zugeordnet. Der Algorithmus zur Erstellung eines BSP Baumes arbeitet dabei wie folgt:

1. Wähle eine Hyperebene H .
2. Erzeuge einen Knoten im BSP Baum und ordne H diesem Knoten zu.
3. Für jedes Objekt:
 - a) Liegt das Objekt vollständig in H^+ füge es in die Liste L_{H^+} ein.
 - b) Liegt das Objekt vollständig in H^- füge es in die Liste L_{H^-} ein.
 - c) Wird das Objekt von H geschnitten, teile es entlang der Hyperebene in zwei Objekte und füge diese in die entsprechenden Listen L_{H^+} bzw. L_{H^-} ein.
 - d) Ist das Objekt ein Teil der Hyperebene oder liegt vollständig auf dieser füge es zum Knoten hinzu.
4. Wiederhole den Algorithmus für alle Objekte aus L_{H^+} .
5. Wiederhole den Algorithmus für alle Objekte aus L_{H^-} .

Ein Beispiel für einen erzeugten BSP Baum ist in Abbildung 4.1 dargestellt, wobei die Objekte in Form von Linien als Hyperebenen verwendet werden. Neben der dargestellten, zufälligen Wahl der Hyperebene kann hierfür auch ein im Raum vorhandenes Objekt, beispielsweise in Form einer Linie gewählt werden. Dabei hat die Wahl der Teilungsebene einen starken Einfluss auf die Effizienz in Form der Ausgeglichenheit und somit auf die Suchzeit. Allerdings werden in der Regel keine ausgeglichenen Bäume erzeugt, weshalb diese im schlechtesten Fall in linearer Zeit durchlaufen werden. Zur Bestimmung der Hyperebene können unterschiedliche Strategien [2, 27] verwendet werden, wobei der entstehende BSP Baum möglichst ausgeglichen sein

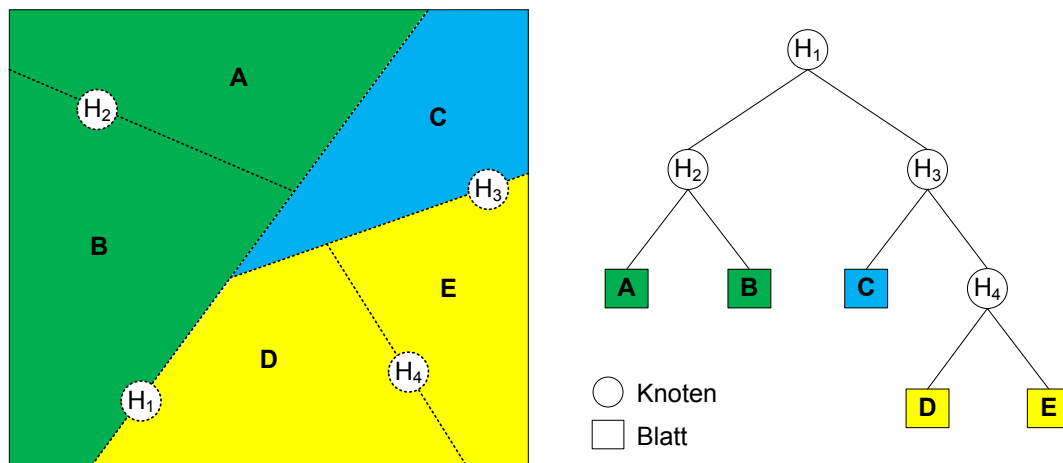


Abbildung 4.1: Beispielhafte Ausprägung eines BSP Baumes

sollte und gleichzeitig möglichst wenige Objekte durch die Teilungsebene geschnitten werden. Dadurch sollen Teilungsoperationen für einzelne Objekten vermieden und insgesamt eine effizientere Suche gewährleistet werden.

Quadtree

Bei Quadrees handelt es sich ebenfalls um Baumstrukturen, die im Gegensatz zu BSP Bäumen anstatt zwei Nachfolgern vier Nachfolger besitzen. Dieses Verfahren kommt in der Regel für die Partitionierung von zweidimensionalen Räumen bzw. den darin enthaltenen Daten zum Einsatz. Hierbei wird die geografische Fläche rekursiv in vier gleich große Quadrate oder Rechtecke unterteilt [78]. Die Datenobjekte sind, wie beim BSP Baum, in den Blättern bzw. Zellen enthalten, wobei eine maximale Kapazität vorgegeben ist bevor die entsprechende Zelle in vier kleinere Zellen unterteilt wird. Eine minimale Kapazität ist nicht vorgeschrieben, so dass es leere Zellen geben kann, die keine Daten enthalten, was in der Regel zu einer nicht balancierten Struktur führt. Diesbezüglich kann allerdings ein Schwellwert definiert werden, ab dem sich die Nachfolgerzellen wieder zusammenfassen lassen. Daher passt sich die Struktur besser an die vorhandenen Daten an, da der Baum in Bereichen mit vielen Daten verdichtet wird, wohingegen Bereiche mit weniger Daten unberührt bleiben oder wieder zusammengefasst werden. Diese Struktur ist dadurch insbesondere für die Verwaltung dynamischer Informationen geeignet [284]. Die Unterteilung des Raumes für Punktmengen erfolgt dabei nach folgender Definition, wobei einerseits eine quadratische Region betrachtet wird und andererseits die Zellen mit mehr als einem Punkt geteilt werden sollen:

Sei Q ein Quadrat, welches alle Punkte $p \in P$ enthält und einen zweidimensionalen Raum $\mathbb{R}^2 := [x_Q : x'_Q] \times [y_Q : y'_Q]$ beschreibt.

Falls $|P| \leq 1$, besteht der Quadtree aus einem Blatt, welches durch Q definiert ist und P enthält.

Falls $|P| > 1$, seien Q_{NW} , Q_{NE} , Q_{SW} und Q_{SE} die vier Quadranten von Q und seien

$\bar{x} = \frac{x_Q' + x_Q}{2}$ und $\bar{y} = \frac{y_Q' + y_Q}{2}$ die Grenzen der Quadranten, dann sind:

$$P_{NW} = \{p \in P | p_x \leq \bar{x} \wedge p_y > \bar{y}\}$$

$$P_{NE} = \{p \in P | p_x > \bar{x} \wedge p_y > \bar{y}\}$$

$$P_{SW} = \{p \in P | p_x \leq \bar{x} \wedge p_y \leq \bar{y}\}$$

$$P_{SE} = \{p \in P | p_x > \bar{x} \wedge p_y \leq \bar{y}\}$$

die Punktmengen in diesen Quadranten. Damit besteht der Quadtree aus einem Knoten k , in dem Q gespeichert ist und vier Blättern, die die entsprechenden Quadranten definieren und die jeweiligen Punktmengen enthalten. Der Algorithmus zur Erstellung eines Quadtree arbeitet dabei wie folgt:

1. Bestimme einen Raum, der alle Punkte enthält.
2. Unterteile den Raum in vier gleich große Quadranten und ordne alle Punkte den entsprechenden Quadranten zu.
3. Unterteile rekursiv die entstandenen Quadranten bis die Anzahl von maximal n Punkte in einem Quadranten erreicht sind.

Ein Alternatives Abbruchkriterium kann durch eine Beschränkung der Baumtiefe angegeben werden. Neben Punkten lässt sich diese Datenstruktur auch auf Polygone und Linien anwenden, wobei das jeweilige Objekt entweder an den Grenzen der Hyperebene geteilt oder die Zellen in jede Dimension vergrößert werden können, so dass sich das Objekt vollständig in einem der Quadranten befindet. Wenn die Zellen entsprechend vergrößert werden spricht man auch von Loose Quadtree [303]. Ein Beispiel eines erzeugten Quadtree zur Verwaltung von Punktmengen ist in Abbildung 4.2 veranschaulicht.

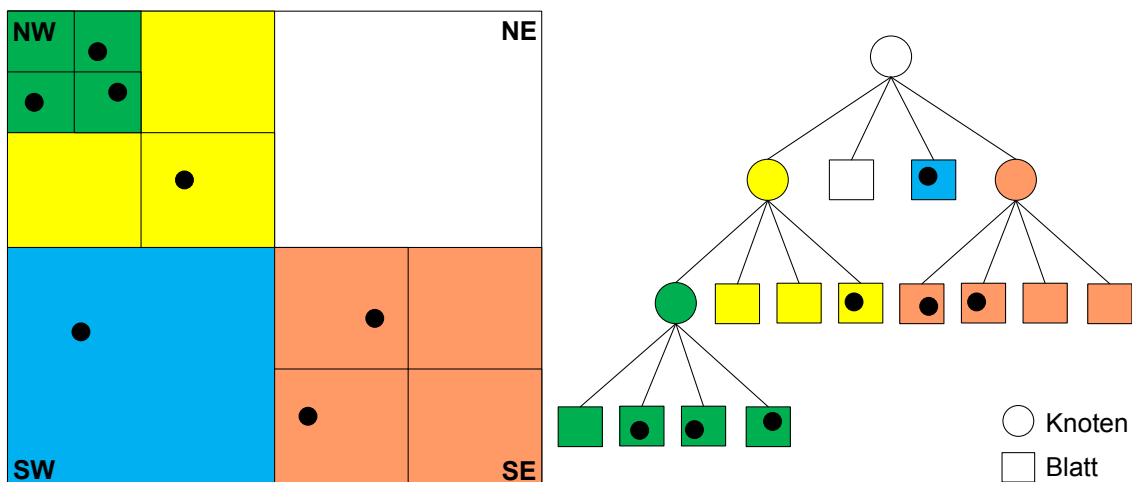


Abbildung 4.2: Beispielhafte Ausprägung eines Quadtree

4.3 Routen- und Tourenplanung

In Verbindung mit Verkehrssystemen konzentriert sich die Routen- oder Tourenplanung auf die Suche nach der kürzesten Strecke zwischen zwei Punkten innerhalb eines Wegenetzes. Mit der kürzesten Strecke ist diejenige gemeint, die die geringsten Kosten, beispielsweise in Form von Wegstrecke, Zeit, Fahrtkosten oder Energie verursacht. Eines der bekanntesten Probleme der Tourenplanung ist das Problem des Handlungsreisenden (englisch: Traveling Salesman Problem, TSP), wobei es sich um ein kombinatorisches Optimierungsproblem handelt. Hierbei soll eine Reihenfolge für den Besuch mehrerer Orte gefunden werden, so dass die zurückgelegte Strecke zu allen Orten und zurück zum Ausgangspunkt minimal ist. In den folgenden Abschnitten soll diese Problemstellung zunächst mit Hilfe der Graphentheorie allgemein modelliert werden, bevor im Anschluss einige zum TSP verwandte Problemklassen zusammen mit entsprechenden Lösungsansätzen vorgestellt werden. Abschließend wird ein eigener kooperativer Ansatz vorgestellt, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde und sich unter Verwendung dynamischer Transferknoten (englisch: Dynamic Transfer Node, DTN) insbesondere dem Problem der Tourenplanung zur Beförderung von Personen annimmt, bei der mehrere Fahrzeuge eingesetzt und dynamische im Vorfeld unbekannte Transportanfragen berücksichtigt werden.

4.3.1 Modellierung von Wegnetzen

Damit das Problem der Routenplanung mathematisch gelöst werden kann, wird zunächst ein Modell benötigt, welches die reale Situation abbildet. Diesbezüglich lassen sich Verkehrssysteme, bei denen Straßen bzw. Verkehrsnetze die Grundlage bilden, als Graph modellieren. Bei einem Graph handelt es sich um eine abstrakte Struktur aus der Graphentheorie, die eine Menge von Objekten und Verbindungen zwischen diesen repräsentiert. Mit Hilfe von Graphen lassen sich daher einerseits Kommunikations- oder Computernetzwerke beschreiben, wobei die kommunizierenden Entitäten als Knoten bezeichnet werden und die Kommunikations- oder Netzwerkverbindungen durch Kanten beschrieben werden. Im Gegensatz hierzu repräsentieren die Knoten in einem Verkehrsnetz einzelne Kreuzungen und die Kanten beschreiben die Straßen über die die Kreuzungen miteinander verbunden sind. Die Graphentheorie unterscheidet dabei ungerichtete und gerichtete Graphen, wobei letztere lediglich in einer Richtung durchlaufen werden können und mit einem Pfeil gekennzeichnet sind. Des Weiteren existieren auch sogenannte Multigraphen, bei denen zwei Knoten durch mehrere Kanten miteinander verbunden sein können. Dadurch lassen sich beispielsweise zwei Haltestellen modellieren, die von unterschiedlichen Buslinien bedient werden, aber auf unterschiedlichen Strecken fahren und dabei nicht die gleiche Fahrzeit zwischen den Haltestellen benötigen.

Ein Graph G ist ein Tupel aus einer Menge von Knoten V (englisch: Vertices, V) und einer Menge von Kanten E (englisch: Edges, E): $G = (V, E)$. Zur Modellierung von Straßennetzen werden typischerweise gerichtete Multigraphen verwendet, um die entsprechenden Besonderheiten, wie beispielsweise Einbahnstraßen, berücksichtigen zu können. Dabei ist E eine Teilmenge über dem kartesischen Produkt $V \times V$: $E \subseteq V \times V$,

wobei jedem $e \in E$ ein Paar $(v_i, v_j) \in V^2$ zugeordnet werden kann [133]. Hierbei können die Kanten zusätzlich gewichtet bzw. bewertet werden, wobei die Länge eines Weges durch den entsprechenden Graphen der Summe der Kantengewichte $\omega_{i,j}$ zwischen den jeweiligen Knoten v_i und v_j entlang des gewählten Weges entspricht. Ein gewichteter Graph wird formal auch durch $G(V, E, \omega)$ beschrieben, wobei jedem $e \in E$ ein entsprechendes Gewicht in Form einer Funktion $\omega : e \rightarrow \mathbb{R}$ zugeordnet ist. Mit Bezug auf ein Straßennetz kann neben der Länge eines Wegstückes, beispielsweise auch die Zeit, in der die Kante durchlaufen wird, als Gewicht genutzt werden. Allerdings sind hierfür neben der reinen Distanz zusätzliche Informationen, wie die maximal erlaubte oder vom Fahrzeug mögliche Geschwindigkeit, notwendig. In Verbindung mit Graphen existieren noch weitere Eigenschaften [325], wobei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen wird. Unter Verwendung eines Graphen lassen sich Straßennetze modellieren, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, wobei in diesem Beispiel die vereinfachte Darstellung in Form eines ungerichteten Graphen gewählt wurde. Ausgehend von diesem Modell können nun mathematische Verfahren angewendet werden, mit denen sich beispielsweise der kürzeste oder schnellste Weg berechnen lässt. Auf zwei grundlegenden Verfahren zur Berechnung des kürzesten Weges wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

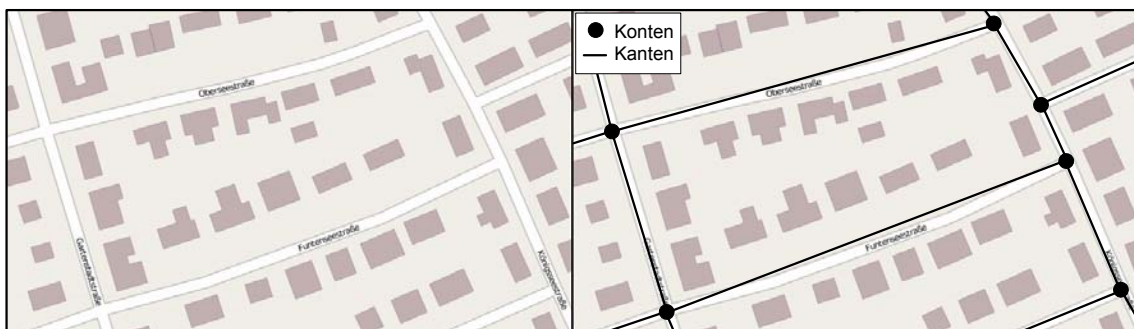


Abbildung 4.3: Modellierung eines Straßennetzes (links) als Graph (rechts)

4.3.1.1 Berechnung von kürzesten Wegen

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass die Gewichte eines Straßennetzes nicht negativ sind, wobei für einen solchen Fall entsprechende Algorithmen, wie der Bellman-Ford Algorithmus [15, 81], zur Lösung des kürzesten-Wege Problems verwendet werden können. Der Algorithmus von Dijkstra [55] gehört zur Klasse der Greedy Algorithmen und ist eines der ersten Verfahren zur Lösung des sogenannten Eine-Quelle-Kürzester-Weg Problems (englisch: Single Source Shortest Path Problem) [41], bei dem ausgehend von einem Knoten die kürzesten Wege zu allen anderen Knoten in einem Graphen mit nicht negativen Kantenbewertungen gesucht werden [172]. Der Algorithmus arbeitet wie folgt:

1. Initialisiere den Startknoten mit der bisher zurückgelegten Distanz $d = 0$ (permanent) und alle anderen mit $d = \infty$ (temporär) und setze den Startknoten als aktiven Knoten v_i .
2. Berechne die temporären Distanzen zu allen vom aktiven Knoten v_i erreichbaren Nachbarknoten v_j : $d_{v_j} = d_{v_i} + \omega_{i,j}$.
3. Wenn die berechnete Distanz eines der Knoten v_j kleiner ist als die aktuelle, temporäre

Distanz, aktualisiere diese und setze den aktuellen Knoten v_i als Vorgänger.

4. Wähle den Knoten mit minimaler, temporärer Distanz als nächsten aktiven Knoten v_i und markiere seine Distanz als permanent.
5. Wiederhole ab Schritt 2, bis die Distanzen aller Knoten permanent sind.

Ist man lediglich an der kürzesten Route zu einem bestimmten Knoten interessiert, kann der Algorithmus in Schritt 4 abgebrochen werden, sofern der aktive Knoten dem gesuchten Knoten entspricht. Im Fall von dünn besetzten Graphen, die im Vergleich zu den Knoten verhältnismäßig wenige Kanten besitzen, kann die Laufzeit des Dijkstra Algorithmus durch die Speicherung des Graphen in Form von Nachbarschaftslisten und unter Verwendung einer Warteschlange mit Prioritäten die Laufzeit deutlich verringert werden. Die Nachbarschaftslisten enthalten für jeden Knoten alle erreichbaren Nachbarn. In der Warteschlange werden die Knoten mit temporären Distanzen hinterlegt, so dass eine effiziente Auswahl des nächsten aktiven Knotens mit der geringsten bisherigen Distanz gewährleistet ist [262]. Beim Einsatz des bidirektionalen Dijkstra Algorithmus, der sowohl vom Start- als auch vom Zielpunkt aus mit der Suche beginnt, ist eine Halbierung des Suchraums möglich [49, 173]. Im Zusammenhang mit dem Straßennetz existieren mittlerweile neuere Ansätze, die beispielsweise auf Straßenhierarchien basieren [288] und neben zusätzlichen Informationen auch entsprechende Vorberechnungen erfordern.

Eine Erweiterung des Dijkstra Algorithmus in Form des A* Algorithmus [97] beruht auf dem Einsatz einer Schätzfunktion oder Heuristik, die eine zielgerichtete Suche erlaubt. Hierfür wird eine garantierte, untere Schranke zur Abschätzung der Distanz zum Ziel benötigt. Diesbezüglich müssen allerdings zusätzliche Informationen über den Graphen, wie beispielsweise die geografische Topologie bekannt sein, die zur Schätzung der Entfernung zum Ziel notwendig ist. Dabei wird die zusätzliche Steuerungsfunktion $f(v) = d(v_o, v_i) + h(v_i)$ eingeführt, wobei $d(v_o, v_i)$ der Distanz vom Startknoten v_o zum Knoten v_i entspricht und $h(v_i)$ die Schätzfunktion darstellt, mit der die restliche Strecke vom Knoten v_i zum Zielknoten geschätzt wird. Bezüglich der garantierten unteren Schranke muss dabei die Bedingung $0 \leq h(v_i) \leq \delta(v_i, v_d)$ erfüllt sein, wobei $\delta(v_i, v_d)$ der Distanz des tatsächlichen kürzesten Weges vom Knoten v_i zum Zielknoten v_d entspricht. Dabei erfüllt die Schätzfunktion auch die Dreiecksungleichung, die besagt, dass für zwei beliebige Knoten u und v die Distanz von u zum Zielknoten kleiner oder gleich der Distanz von v zum Zielknoten addiert mit der minimalen Distanz zwischen u und v ist: $h(u) \leq h(v) + \delta(u, v)$. Der eigentliche Algorithmus arbeitet dabei wie der Dijkstra Algorithmus, wobei für jeden untersuchten Knoten neben der Distanz vom Startknoten zusätzlich die Distanz bis zum Zielknoten geschätzt wird. Die Auswahl des nächsten Knoten erfolgt basierend auf der Kombination dieser beiden Werte. Eine geeignete Schätzfunktion bezüglich der Distanz im Zusammenhang mit Straßennetzen und unter Kenntnis der geografischen Informationen ist die Luftlinie bzw. die euklidische Distanz. Im schlechtesten Fall entspricht die Laufzeit zwar der des Dijkstra Algorithmus, wobei durchschnittlich weniger Knoten untersucht werden müssen, was insbesondere bei großen Graphen vorteilhaft ist. Neben dem kürzesten Weg lässt sich mit beiden Verfahren, abhängig von den verfügbaren Informationen, auch der schnellste Weg berechnen. Hierbei wird anstelle der Distanz die Zeit, die für die entsprechenden Streckenabschnitte benötigt wird,

als Kantengewicht verwendet. Für die Schätzfunktion des A* Algorithmus kann eine geeignete durchschnittliche Geschwindigkeit angenommen werden.

Basierend auf der Berechnung von Routen zwischen zwei Punkten eines Graphen, können auch komplexere Fragestellungen im Zusammenhang mit der Planung einer Tour berechnet werden. Eine Tour besteht in der Regel aus unterschiedlichen Knoten, die in entsprechender Reihenfolge besucht werden müssen. Dabei handelt es sich um ein kombinatorisches Problem, bei dem die Reihenfolge gesucht wird, die die geringsten Kosten verursacht. Typische Kosten sind beispielsweise die Distanz oder die Zeit.

4.3.2 Klassen und Ansätze zur Lösung von Tourenplanungsproblemen

Die Tourenplanung beschäftigt sich im Wesentlichen mit dem Sammeln und Verteilen von Gütern [6], wobei nach [115] zwischen zwei wesentlichen Entscheidungsaufgaben, der Reihenfolgeplanung und Zuordnungsentscheidung, unterschieden werden kann:

1. Bei der Reihenfolgeplanung soll eine bestimmte Anzahl von Kunden nacheinander bedient werden. Mit diesem Aspekt setzt sich das TSP auseinander. Dabei wird versucht die Reihenfolge für den Besuch von mehreren Orten so zu Optimieren, dass der Gesamtreiseweg inklusive der Rückkehr zum Ausgangsort minimal ist und befasst sich somit ausschließlich mit der Reihenfolgeplanung.
2. Bei der Zuordnungsentscheidung, bei der in der Regel mehrere Fahrzeuge zum Einsatz kommen, wird neben der Reihenfolgeplanung zusätzlich entschieden, welches Fahrzeug welchen Kunden bedient. Das sogenannte Vehicle Routing Problem (VRP) beschäftigt sich daher neben der Reihenfolge auch mit der Zuordnung von zu besuchenden Orten zu Fahrzeugen.

Eine weitergehende Problemstellung in Verbindung mit der Tourenplanung stellt das sogenannte Pickup and Delivery Problem (PDP) dar, wodurch das VRP um eine Vorrangbedingung erweitert wird. Diese besagt, dass sich ein Auftrag aus zwei Orten zusammensetzt, wobei zunächst die Ware an einem Ort abgeholt und anschließend an einem anderen Ort abgeliefert wird. Die Problemstellung der Routenplanung in Verbindung mit Personen, die ebenfalls an einem Ort abgeholt und zu einem anderen transportiert werden, wird in der Literatur mit Dial-a-Ride Problem (DARP) bezeichnet und entspricht dem PDP, wobei neben der Vorrangbedingung in der Regel Zeitfenster hinzukommen, mit denen die Abhol- bzw. Ablieferungszeit oder die maximale Reisezeit festgelegt werden kann. Ergänzend zu den genannten Problemstellungen existieren noch weitere Spezialisierungen, bei denen zusätzliche Einschränkungen berücksichtigt werden. In Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Merkmale zur Charakterisierung von Routenplanungsproblemen aufgeführt, wobei auch geeignete Kombinationen unterschiedlicher Einschränkungen möglich sind.

Zusätzlich kann zwischen der statischen und dynamischen Tourenplanung unterschieden werden [17], wobei sich diese Differenzierung auf den Planungszeitpunkt bezieht und die Berechnung von Touren in Echtzeit und damit parallel zur Tourenaufführung stattfindet [115]. Einfacher ausgedrückt können bei der dynamischen Variante während der Ausführung zusätzliche Anfragen bzw. Aufträge hinzukommen, die zum Zeitpunkt der ursprünglichen Planung noch nicht bekannt waren, wohingegen bei der statischen Tourenplanung lediglich die

Merkmal		Ausprägung
Fahrzeuge	Anzahl	- ein Fahrzeug - mehrere Fahrzeuge
	Flottengröße	- feste Anzahl von Fahrzeugen - dynamische Anzahl von Fahrzeugen
	Homogenität	- Fahrzeuge sind gleich - unterschiedliche Fahrzeuge
	Kapazität	- keine Begrenzung - begrenzte Kapazität
	Standort der Fahrzeuge	- ein Depot - mehrere Depots - kein fester Standort
	Einsatzzeit	- ohne Begrenzung - Begrenzung (Zeit/Strecke)
Aufträge	Ort der Nachfrage	- auf den Knoten des Verkehrsnetzes (Kreuzungen) - auf den Kanten des Verkehrsnetzes (Straßen)
	Art der Nachfrage	- statisch (vor der Ausführung) - dynamisch (während der Ausführung)
	Zeitfenster	- keine - weiche (sollten eingehalten werden) - harte (müssen eingehalten werden)
	Transfers	- ohne - möglich (bisher nur an statischen Knoten)
	Disponierbarkeit	- Durchführung aller Aufträge - Aufträge können abgelehnt werden

Tabelle 4.2: Merkmale für Routenplanungsprobleme in Anlehnung an [138]

zum Planungszeitpunkt vorhanden Informationen genutzt werden und dadurch keine Anfragen während der Laufzeit berücksichtigt werden [16]. Im Zusammenhang mit den angesprochenen Tourenplanungsproblemen existieren entsprechende mathematische Modelle, wobei für weitergehende Informationen an dieser Stelle insbesondere auf die Dissertation von Huth [115] und dessen detaillierte Ausführungen verwiesen wird.

Zur Lösung dieser Problemstellungen soll im weiteren Verlauf ein Überblick bestehender Lösungsansätze gegeben werden, bei denen zwischen exakten Lösungsverfahren, klassischen heuristischen Verfahren und metaheuristischen Verfahren unterschieden wird, die in Abbildung 4.4 veranschaulicht sind.

4.3.2.1 Exakte Verfahren

Exakte Lösungsverfahren berechnen eine optimale Lösung für ein kombinatorisches Optimierungsproblem. Allerdings sind diese Ansätze auf Grund der stark anwachsenden Problemgröße mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden und können in der Praxis lediglich für sehr begrenzte Instanzen verwendet werden. Beispielsweise besteht der Lösungsraum des TSP, welches als Teilproblem beim VRP, PDP oder DARP auftritt, bei 10 Städten ($(n - 1)!$ mit $n = 10$) bereits aus 362.880 Möglichkeiten. Bei $n = 20$ Städten existieren bereits $1,216451 \cdot 10^{17}$ Möglichkeiten, sofern die Wegkosten von der Richtung abhängig sind und das entsprechende Netzwerk durch einen gerichteten Graphen modelliert wird. Unter der Annahme, dass die Berechnung einer Tour in einer Nanosekunde erfolgt, würde die

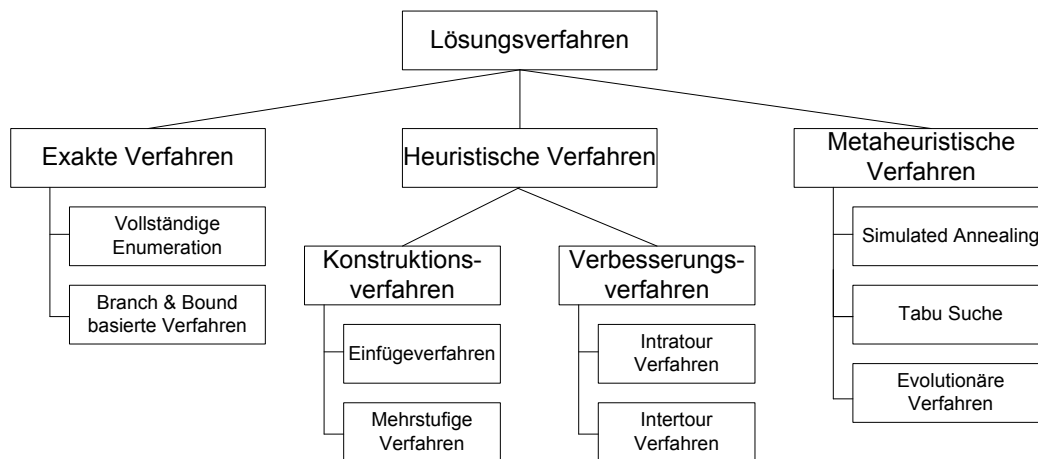


Abbildung 4.4: Überblick von Lösungsansätzen zur Tourenplanung nach [138]

erschöpfende Suche nach der optimalen Tour bei 20 Städten annähernd 4 Jahre in Anspruch nehmen. Verfahren die alle existierenden Möglichkeiten untersuchen, um anschließend diejenige mit den geringsten Kosten auszuwählen, werden in der Literatur mit vollständiger Enumeration bezeichnet [10]. Neben der vollständigen Enumeration existieren auch Verfahren, die sich der impliziten Enumeration bedienen. Dabei handelt es sich um sogenannte Entscheidungsbaumverfahren die sich nach [139] wiederum in direkte Suchbaummethoden, ganzzahlige lineare Programmierung und dynamische Programmierung unterteilen lassen. In der erwähnten Arbeit werden, neben der zuvor erwähnten mathematischen Modellierung, für die entsprechenden Klassen jeweils repräsentative Beispiele vorgestellt und erläutert. Die gleiche Unterteilung für die implizite Enumeration ist auch in [10] zu finden, wobei zusätzlich wissenschaftliche Arbeiten für jede der genannten Klassen zusammen mit dem Verfahren und der damit gelösten Problemart aufgeführt sind. Ein klassischer Vertreter direkter Suchbaummethoden ist das Branch & Bound Verfahren, bei dem das gesamte Problem in überschneidungsfreie Teilprobleme zerlegt wird (Branch). Je nach Ansatz werden Teilprobleme durch eine Fixierung oder das Weglassen von Variablen sowie die Einführung zusätzlicher Beschränkungen erzeugt. Anhand geeigneter oberer bzw. unterer Schranken lassen sich anschließend Rückschlüsse auf die Güte der einzelnen Teilprobleme ziehen, so dass diese gegebenenfalls nicht weiter betrachtet werden müssen und daher von der expliziten Untersuchung ausgeschlossen werden können (Bound). Durch die Reduzierung der zu betrachtenden Teilprobleme kann die Laufzeit im Vergleich zur erschöpfenden Suche erheblich verbessert werden. Für weitere Variationen dieses Verfahrens, wie Branch & Cut [14, 40, 279] oder Branch & Cut & Price [278] sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen.

Nachdem exakte Verfahren trotz einiger Verbesserungen im Hinblick auf die Skalierbarkeit unpraktikabel viel Zeit in Anspruch nehmen, werden im Folgenden einige heuristische Verfahren erläutert, die zwar nicht beweisbar zu optimalen Ergebnissen führen, aber dennoch in kurzer Zeit verhältnismäßig gute Lösungen für große Instanzen liefern. Wie bereits in Abbildung 4.4 dargestellt, kann hierbei zwischen klassischen und metaheuristischen Verfahren unterschieden werden, auf die in den folgenden Abschnitten kurz eingegangen wird.

4.3.2.2 Klassische heuristische Verfahren

Heuristische Ansätze nutzen oft Näherungsverfahren, um möglichst schnell brauchbare Lösungen zu erzeugen, wobei in der Regel keine Aussagen über die Güte der gefundenen Lösung getroffen werden können. Abhängig davon, ob mit Hilfe dieser Verfahren eine neue Tour generiert wird oder eine bereits bestehende Tour optimiert werden soll, handelt es sich um Konstruktions- oder Verbesserungsverfahren. Mit Hilfe der Konstruktionsverfahren können initiale und gültige Lösungen erzeugt werden, wohingegen Verbesserungsverfahren von einer gültigen Lösung ausgehen und versuchen diese schrittweise zu verbessern.

Konstruktionsverfahren:

Ein intuitives Konstruktionsverfahren ist die sogenannte Nearest Neighbor Heuristik [80, 312], bei der ausgehend von einer bestimmten Position, beispielsweise dem Startdepot, immer das nächstgelegene Ziel der Tour hinzugefügt wird. Anschließend wird dieser Vorgang von der neuen Position wiederholt, bis schließlich alle geforderten Punkte in die zu konstruierende Tour aufgenommen wurden. Die hierzu verwandte Farthest Neighbor Heuristik wählt im Gegensatz zum nächstgelegenen Ziel jenes aus, welches am weitesten vom aktuellen Standort entfernt ist. In Verbindung mit dem PDP muss hierbei noch die Vorrangbedingung beachtet werden, wobei zu Beginn lediglich Abholpositionen verwendet werden können und erst nachdem einer dieser Punkte besucht wurde, auch die entsprechende Ablieferungsposition berücksichtigt werden kann.

Ein weiteres populäres Konstruktionsverfahren basiert auf der Savings Heuristik [38] und wurde mittlerweile für unterschiedliche Problemstellungen angepasst [138]. Dabei werden zunächst initiale Touren, sogenannte Pendeltouren, von einem Depot zu jedem der Zielorte erzeugt. Im Fall des PDP führen diese vom Depot zunächst zur entsprechenden Abholposition, anschließend zur Ablieferungsposition und schließlich wieder zum Ausgangsdepot. Im zweiten Schritt wird durch sukzessives Zusammenlegen zweier Touren versucht die Einsparung in Form der Weglänge zu maximieren. Die jeweiligen Ergebnisse werden verglichen, und die Tour mit der größten Einsparung wird übernommen, wobei sich mit jedem Iterationsschritt die Anzahl der möglichen Kombinationen verringert, bis das Verfahren terminiert.

Eine weitere Klasse basiert auf der Insertion Heuristik [164]. Abhängig vom Verfahren, Nearest, Cheapest oder Random Insertion, wird zunächst ein zu besuchender Ort ausgewählt und in eine neue Tour eingefügt. Anschließend wird ein weiterer Ort gesucht, der den geringsten Abstand zu einer Kante der bestehenden Tour hat. Da dieser auch zur geringsten Verlängerung der bestehenden Tour führt, wird der jeweilige Ort in die Tour eingefügt, wobei die bestehende Tour an der entsprechenden Stelle geteilt wird.

Der Sweep Algorithmus [92, 329, 330] arbeitet in zwei Phasen und gehört zur Klasse der Cluster First Route Second Verfahren, wobei unter Verwendung eines geometrischen Verfahrens zunächst die zu besuchenden Knoten anhand ihrer Polarwinkel aufsteigend sortiert werden. Anschließend wird ein noch unbenutztes Fahrzeug gewählt, dem der Reihe nach die zuvor sortierten Punkte zugewiesen werden, bis eine Einschränkung, beispielsweise in Form der Fahrzeugkapazität, verletzt wird. Dieser Clusteringsschritt wird so lange wiederholt, bis alle Punkte den jeweiligen Fahrzeugen zugeordnet sind. In der zweiten Phase wird für jeden der

zuvor gebildeten Cluster die Reihenfolgeentscheidung bezüglich der zu besuchenden Knoten getroffen, wofür eines der zuvor beschriebenen Verfahren verwendet werden kann. Eine andere Möglichkeit wird in Form eines ortsbasierte Clusterings in [23] vorgestellt. Weitere Verfahren auf Basis des Petal Algorithmus sind in [79, 83] zu finden. Im Gegensatz zum Petal Algorithmus, wird bei der Gruppe der Route First Cluster Second Verfahren [11] zunächst eine Tour ohne Berücksichtigung von Einschränkungen gebildet, die aus sämtlichen Punkten besteht. Nachdem der Tour eine Richtung zugewiesen wurde, werden die Knoten nacheinander einem Fahrzeug zugewiesen, wobei in dieser zweiten Phase die Nebenbedingungen berücksichtigt werden, wodurch die zuvor erzeugte, vollständige Tour in kleinere gültige Touren zerlegt bzw. geclustert wird.

Verbesserungsverfahren:

Verbesserungsverfahren arbeiten auf einer zuvor erzeugten, suboptimalen Tour mit dem Ziel, diese mit Hilfe entsprechender Ansätze zu verbessern. Dabei kann zwischen Intratour und Intertour Verbesserungsverfahren unterschieden werden [10, 138], wobei erstere versuchen die Reihenfolge innerhalb einer einzelnen Tour zu verbessern, während Intertour Verbesserungsverfahren einzelne Aufträge vollständig zwischen unterschiedlichen Touren zu tauschen, um dadurch eine Verbesserung zu erzielen.

Zu den Intratour Verbesserungsverfahren zählt die 2-Opt Heuristik [46], die auf der Idee basiert zwei nicht benachbarte Kanten einer Tour zu tauschen und eine so entstehende Verbesserung zu übernehmen. Kommt es zu keiner Verbesserung, wird die Lösung verworfen. Dabei werden zunächst beide Kanten aus einer bestehenden Tour entfernt und anschließend zwei neue Kanten eingefügt, so dass eine neue Tour entsteht, bei der sich die Richtung des Abschnitts zwischen den beiden Kanten umkehrt. Auf diese Weise werden sämtliche Tauschmöglichkeiten untersucht und jeweils die beste Möglichkeit wird übernommen. Weitere Varianten sind die 3-Opt Heuristik, bei der in jedem Iterationsschritt drei Kanten getauscht werden [146] oder die Verallgemeinerung in Form der r -Opt Heuristik [37], wobei jeweils r Kanten getauscht werden. Bei der Erweiterung in Form des Lin-Kernigham Algorithmus [147] muss der Parameter r nicht im Vorfeld angegeben werden sondern kann während der Ausführung angepasst werden.

In [126] werden drei Varianten von Intertour Verfahren vorgestellt. Bei der Customer Relocation Variante wird ein Knoten oder Auftrag bzw. eine entsprechende Folge von der Tour eines Fahrzeuges in die Tour eines anderen Fahrzeuges verschoben. Im Fall des Customer Exchange werden Knoten oder entsprechende Folgen wechselseitig zwischen zwei Touren ausgetauscht, wobei es sich mindestens um einen Auftrag aus jeder Tour handelt. Bei der dritten Variante, dem Crossover, werden zwei unterschiedliche Touren in jeweils zwei Teiltouren zerlegt, die im Anschluss zwischen den beiden Touren ausgetauscht und mit der beibehaltenen Teilroute verbunden werden. Sofern sich durch eine dieser Varianten eine Verbesserung der Gesamtkosten ergibt, werden die neuen Tourenpläne beibehalten, ansonsten wird diese Lösung verworfen und das jeweilige Verfahren mit der nächsten möglichen Tauschoperation wiederholt. Vergleichbare Ansätze sind allerdings auch schon in der Arbeit von Thompson und Psaraffis [306] sowie in der Dissertation von Breedam [24] zu finden. Anzumerken ist, dass bei diesen Ansätzen ausschließlich vollständige Aufträge zwischen den unterschiedlichen Touren

ausgetauscht werden.

4.3.2.3 Metaheuristiken

Das Grundprinzip ist zugleich die Gemeinsamkeit aller metaheuristischen Verfahren und basiert auf der lokalen Suche. Somit sind diese Ansätze mit den zuvor vorgestellten Verbesserungsverfahren vergleichbar, außer dass hierbei auch temporär schlechtere Ergebnisse akzeptiert und weiter betrachtet werden, ohne diese zu verwerfen. Dadurch sind diese Verfahren in der Lage, lokale Optima zu überwinden und in einem möglichen globalen Optimum zu terminieren.

Simulated Annealing [127] orientiert sich am natürlichen Abkühlungsprozess von Feststoffen und baut auf dem Metropolis Algorithmus auf [158]. Übertragen auf die Tourenplanung bedeutet dies, dass eine Verschlechterung der gefunden Lösung mit steigender Anzahl von Iterationen mit geringer werdender Wahrscheinlichkeit zugelassen wird. Basierend auf einer initialen Lösung wird bei jedem Iterationsschritt eine benachbarte Lösungsvariante, beispielsweise durch das Vertauschen der Reihenfolge der zu besuchenden Orte, betrachtet. Anschließend wird die neue Lösung mit dem aktuellen Zustand verglichen und anhand einer Bewertungsfunktion entschieden, ob diese beibehalten wird. Zu Beginn werden dabei auch Lösungen akzeptiert, die zu schlechteren Ergebnissen führen, wobei die Anzahl der Iterationsschritte in der Bewertungsfunktion berücksichtigt werden kann.

Der wohl bekannteste Vertreter der metaheuristischen Verfahren ist die Tabu Suche [94, 93], bei der ebenfalls direkt benachbarte Lösungen betrachtet werden. Hierbei kommt eine Struktur zum Einsatz, in der bereits betrachtete Lösungen gespeichert werden. Die Struktur in Form der sogenannten Tabuliste enthält Regeln, die beispielsweise das Entfernen einer bestimmten Kante aus einer Tour für eine bestimmte Anzahl von Iterationsschritten verbieten oder zu vermeidende Lösungen, die zu einer erheblichen Verschlechterung der Lösung führen oder Nebenbedingungen verletzen, speichern. Dadurch ist einerseits gewährleistet, dass vielversprechende Teillösungen auch in den nächsten Iterationsschritten beibehalten werden und andererseits, dass schlechte Lösungen für eine bestimmte Dauer nicht nochmals betrachtet werden. Die Einträge dieser Liste können für eine unterschiedliche Dauer erhalten bleiben, wobei über das Listenmanagement entschieden werden kann, ob eine kurz-, mittel- oder langfristige Berücksichtigung erfolgen soll.

Genetische Heuristiken [50, 95, 109] gehören zur Klasse der evolutionären Algorithmen, die sich in diesem Fall an der Vererbungslehre orientieren und zunächst Ausgangspopulationen möglicher sowie zulässiger Lösungen gebildet werden. Nach dem Grundgedanken der natürlichen Evolution, werden im Anschluss mit Hilfe von Mutation und Rekombination nachfolgende Generationen gebildet, wofür beispielsweise die zuvor besprochenen Verbesserungsverfahren genutzt werden können. In der Selektionsphase wird im Anschluss nach vielversprechenden Lösungen gesucht und solche aussortiert, die entweder zu einer drastischen Verschlechterung oder zu einer Verletzung von Nebenbedingungen führen.

Ausgehend von dem adressierten Bereich der bedarfsorientierten Transportsysteme (vgl. Abschnitt 2.4.3), sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit dynamische Tourenplanungsprobleme von besonderem Interesse. Ergänzend zu den eben vorgestellten Verfahren und den Sys-

Autor(en)	Verfahren	Problem- klasse	Besonderheiten
Sol und Savelsbergh [152]	Branch & Price	PDPTW	-
Mitrović-Minić und Laporte [161]	Einfügeverfahren, Tabu Suche	PDPTW	ohne Kapazität, Wartestrategien für Fahrzeuge (vor und nach Aufträgen)
Mitrović-Minić et al. [160]	Einfügeverfahren, Tabu Suche	PDPTW	Aufspaltung des Zeithorizontes (kurz und lang)
Pankratz [264]	Einfügeverfahren, genetisches Verfahren	PDPTW	-
Mes et al. [157]	OR-Opt Verbesserungsverfahren	PDPTW	Multiagentensystem, Agenten konkurrieren um Aufträge, temporäre Auftragsablehnung möglich
Madsen et al. [153]	Einfügeverfahren	DARP	zahlreiche Parameter (heterogene Flotte, unterschiedliche Fahrzeugkapazität, Zeitfenster, Prioritäten)
Attanasio et al. [8]	Einfügeverfahren, parallele Tabu Suche	DARP	initiale Planung auf aktuellen (statischen) Informationen, neue Anfragen durch zufälliges Einfügen und Tabu Suche
Coslovich et al. [43]	Einfügeverfahren	DARP	aktuelle Routen in einem Repository, Hinzufügen neuer Anfragen in vorhandene Routen, Auftragsablehnung möglich
Horn [110]	Einfügeverfahren (minimale Kosten), periodische lokale Suche	DARP	Strategie Verteilung von unbenutzten Fahrzeugen basierend auf historischen Daten (Anfragen), Auftragsablehnung möglich
Beaudry et al. [12]	Einfügeverfahren, Tabu Suche	DARP	Verwendung unterschiedlicher Prioritäten, weiche Zeitfenster, heterogene Fahrzeuge, Krankentransport
Xiang et al. [331]	Einfügeverfahren, Intertour Verbesserungsverfahren	DARP	Berücksichtigung zahlreicher Variablen (u.a. Fahrzeugschäden, Stau, Nichterscheinen)

Tabelle 4.3: Ansätze zur Lösung dynamischer Tourenplanungsprobleme in Anlehnung an die Beschreibungen aus [138, 17]

temen aus Abschnitt 3.3.1 sind in Tabelle 4.3 einige Arbeiten sowie die verwendeten Verfahren zusammengefasst, die sich insbesondere mit der dynamischen Tourenplanung in Verbindung mit dem PDP und dem DARP befassen. Auf Grund der sehr umfangreichen Literatur im Zusammenhang mit den Verfahren und Ansätzen zur Lösung von Tourenplanungsproblemen wird an dieser Stelle auch auf die weiterführenden Beschreibungen von Schmitting [287] und Parragh [268] verwiesen. Der nächste Abschnitt befasst sich mit einem eigenen Verfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemen, wobei ein neuer Ansatz zur Kooperation zwischen den einzelnen Fahrzeugen vorgestellt wird.

4.3.3 Kooperativer Ansatz zur Lösung dynamischer Tourenplanungsprobleme

Im Folgenden wird ein kooperativer Ansatz zur Lösung von Tourenplanungsproblemen vorgestellt, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde [61, 64, 66]. Mögliche Modifikationen, auf die in Kapitel 5 genauer eingegangen wird, beziehen sich auf unterschiedliche Modelle der verteilten Kommunikation und unterstützen eine zentrale, eine unterstützende und eine vollständig verteilte Ausführung. Als Basis der drei Verfahren dient das Prinzip der dynamischen Transferknoten (englisch: Dynamic Transfer Nodes, DTNs), welches im folgenden Abschnitt erläutert wird, bevor die Funktionsweise, auf der auch die unterschiedlichen Modifikationen basieren, erläutert wird.

4.3.3.1 Das Prinzip der dynamischen Transferknoten

Zur Erklärung des Prinzips der DTNs zur Kooperation werden zunächst Definitionen aufgeführt, die zum einen verdeutlichen was im Folgenden unter einem DTN verstanden wird und zum anderen wie sich diese von herkömmlichen oder statischen Transferknoten (englisch: Static Transfer Nodes, STNs) unterscheiden. Dabei beziehen sich diese Begriffe nicht nur auf den eigentlichen Ort eines Transfers, sondern auch auf die Topologie des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes.

Ein STN ist ein fest definierter Punkt oder eine Position, an der ein Halt von Transportfahrzeugen möglich ist. An diesen Punkten, die über das vorhandene Straßennetz erreichbar sind, können potenzielle Fahrgäste einsteigen, das Fahrzeug verlassen oder umsteigen, wobei in der Regel eine entsprechende Wartezeit berücksichtigt werden muss. Ein Umsteigen ist lediglich an Knoten möglich, die von verschiedenen Linien bedient werden. Sämtliche statischen Punkte sind dabei über ein festgelegtes Routennetz miteinander verbunden. Dadurch wird ein statisches Transportnetz gebildet, welches sich in der Regel aus einer Vielzahl unterschiedlicher Linien zusammensetzt.

Im Gegensatz dazu, können sich DTNs an beliebigen und zuvor nicht festgelegten Punkten befinden. Eine Voraussetzung ist, dass geltende Bestimmungen, wie sie beispielsweise in der Straßenverkehrsordnung verankert sind, nicht verletzt werden und einen sicheren und regelkonformen Halt von Transportfahrzeugen erlauben. Diese zunächst unbekannten Punkte ermöglichen die gleiche Funktionalität wie STNs. Ein DTN bzw. dessen Position wird allerdings nach Möglichkeit so vereinbart, dass die beteiligten Fahrzeuge annähernd gleichzeitig eintreffen, wodurch die Warte- und Transferzeit minimal ist. Da diese Punkte bei Bedarf vereinbart werden, sind sie nicht über ein festgelegtes Linien- oder Routennetz verbunden, wobei die Erreichbarkeit über das vorhandene Straßennetz gewährleistet ist.

Zur Veranschaulichung der beiden eben aufgeführten Definitionen, stellen beispielsweise Bushaltestellen STNs dar, die über ein Busnetz miteinander verbunden sind. Ein Vertreter der dynamischen Variante können solche Punkte sein, an denen ein Taxi anhalten kann, um den Fahrgästen ein sicheres Ein- bzw. Aussteigen zu ermöglichen. Weitere Vertreter sind bedarfsorientierte Transportsysteme, die bereits in Abschnitt 3.3.1 erwähnt wurden. Allerdings werden im Fall sogenannter Tür-zur-Tür Transporte keine Fahrzeugwechsel berücksichtigt und sofern Umlade- oder Transfermöglichkeiten erwähnt wurden, bestehen diese lediglich an wenigen statischen Punkten. Das Prinzip der dynamischen Transferknoten im Vergleich zu statischen Transferknoten ist in Abbildung 4.5 veranschaulicht. In dem Beispiel auf der linken Seite (STN) sind zwei Fahrzeuge zu sehen, die die Fahrgäste A und B bzw. C und D zu den jeweiligen Zielen befördern. Dabei sind die Ziele von A und C bzw. B und D identisch. Die Fahrzeuge folgen dafür den festgelegten Routen zwischen den Zielen in Form von einzelnen Haltestellen, die entsprechend bezeichnet sind. Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird zunächst der Fahrgast A auf Route 1 bzw. B auf Route 2 abgeliefert, bevor der jeweils zweite Fahrgast zum nächsten Ziel transportiert wird. In diesem Beispiel wird dabei die Strecke zwischen den Haltestellen von beiden Fahrzeugen befahren und der jeweils zweite Fahrgast muss eine Station weiter fahren, was schließlich zu einer höheren Fahrzeit führt.

Auf der rechten Seite ist das Prinzip der dynamischen Transferknoten mit den gleichen

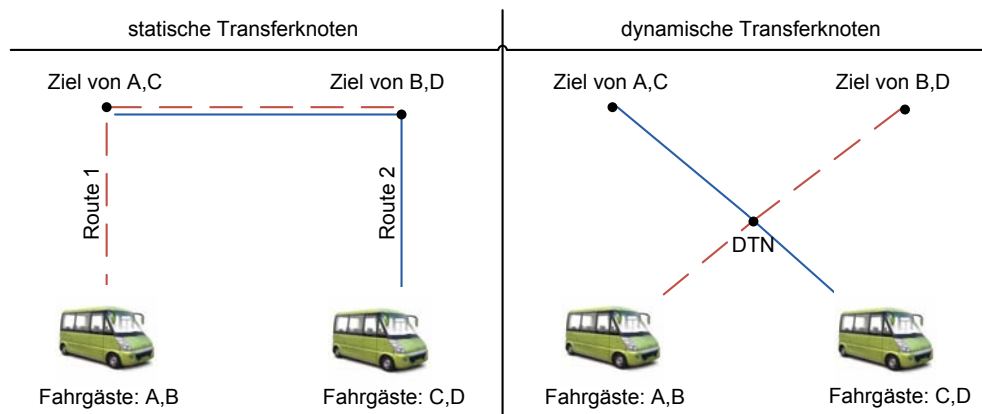


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung statischer und dynamischer Transferknoten

Ausgangsbedingungen aufgezeigt. Für die Kooperation in Form der Vereinbarung eines DTN, muss die Möglichkeit zur Kommunikation und zum Austausch von Informationen gegeben sein. Entsprechende Technologien wurden in Abschnitt 4.1.1 vorgestellt. Nach dem Austausch entsprechender Informationen wurde in diesem Beispiel festgestellt, dass ein Transfer von Fahrgästen sinnvoll ist. Daher wird ein DTN, der von beiden Fahrzeugen möglichst gleichzeitig erreicht werden kann, vereinbart. Sind beide Fahrzeuge am DTN angelangt, beginnt der Transfer der jeweiligen Fahrgäste und sobald dieser abgeschlossen ist, setzen die Fahrzeuge den Transport mit einer neuen Fahrgastverteilung fort. In diesem Beispiel sind nun jeweils zwei Fahrgäste mit den gleichen (oder ähnlichen) Zielen in je einem der Fahrzeuge, die im Anschluss an den Transfer das jeweilige Ziel direkt anfahren und die Fahrgäste abliefern können. Zwar wird die Strecke zwischen den Haltestellen nun nicht von beiden Bussen befahren, aber es muss ein Umweg zum DTN in Kauf genommen werden. Dadurch verlängert sich die Fahrt des jeweils ersten Fahrgastes, aber einerseits verkürzt sich die des jeweils zweiten und andererseits kann die zurückgelegte Strecke beider Fahrzeuge zusammen mit den damit verbundenen Kosten verringert werden.

In dem eben erläuterten Beispiel wurde zunächst davon ausgegangen, dass sich die Fahrgäste bereits in den jeweiligen Fahrzeugen befinden, was im eigentlichen Sinn bereits dem zweiten Schritt des entwickelten Verfahrens entspricht, aber einen guten Überblick der Idee liefert. Im folgenden Abschnitt soll nun die grundlegende Funktionsweise des kooperativen Verfahrens beschrieben werden.

4.3.3.2 Grundlegende Funktionsweise des kooperativen Verfahrens

In diesem Abschnitt wird die grundlegende Funktionsweise des kooperativen Ansatzes zur Tourenplanung erläutert, wobei sich das entwickelte Verfahren aus zwei Phasen zusammensetzt:

1. Phase - Zuordnung und Zielbestimmung:

In der ersten Phase wird eine Zuordnungsentscheidung getroffen, bei der die Fahrgäste den zur Verfügung stehenden Fahrzeugen zugewiesen werden. Unter der Annahme, dass beim Personentransport in städtischen Regionen zahlreiche Anfragen in kurzen

Zeitabständen auf mehrere Fahrzeuge verteilt werden müssen, kommt hierfür eine erweiterte Variante der Nearest Neighbor Heuristik (vgl. Abschnitt 4.3.2.2) zum Einsatz, wobei die Ablieferungsposition bei diesem Konstruktionsverfahren zunächst vernachlässigt wird. Das bedeutet, dass jeder Fahrgast unabhängig vom eigentlichen Ziel anhand seiner Abholposition dem Fahrzeug zugeordnet wird, welches unter anderem den geringsten Abstand zur jeweiligen Fahrgastposition hat. Bei der Erweiterung werden neben der Distanz zusätzliche Parameter berücksichtigt, die für einen effizienten Transport relevant sind. Die Parameter können sich dabei aus der Wartezeit, der Fahrzeit und der zu fahrenden Distanz zusammensetzen, über die ein gewichtetes arithmetisches Mittel gebildet wird. Bezüglich der Fahrzeit muss allerdings zwischen aktuellen und wartenden Fahrgästen unterschieden werden. Wartende Fahrgäste werden im Folgenden auch als Reservierungen bezeichnet.

Sei $R = \{R_1, \dots, R_n\}$ eine Menge von wartenden Fahrgästen, wobei $n \leq R$, mit R als Anzahl der maximal möglichen Reservierungen des Fahrzeugs, dann beschreibt das Tupel $R_i = \{d_i^a, t_i^w, d_i^g\}$ einen wartenden Fahrgast R_i . Dabei ist d_i^a die Distanz von der aktuellen Position des Fahrzeugs zur Abholposition von R_i (in Metern), t_i^w die bisher verstrichenen Wartezeit von R_i (in Minuten) und d_i^g die insgesamt zurückzulegende Distanz von R_i (in Metern). Und sei $\omega_R = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ ein Gewichtungsvektor mit $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$. Zusätzlich ist im Zusammenhang mit den Wertebereichen der einzelnen Parameter eine geeignete Transformation notwendig, um vergleichbare Werte zu erhalten, wie beispielsweise:

$$d_{i,trans}^j = \frac{2}{Maximum((2 + \epsilon), \log(d_i^j))}, \text{ mit } j \in \{a, g\} \quad (4.1)$$

$$t_{i,trans}^w = 1 - \frac{1}{Maximum((1 + \epsilon), \sqrt{t_i^w})} \quad (4.2)$$

Mit Hilfe der folgenden Formel werden die Kosten der wartenden Fahrgäste basierend auf der Distanz zum Fahrzeug, der Wartezeit und der zurückzulegenden Distanz bestimmt:

$$c(R_k) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\omega_i \cdot R_{k,i}) \quad (4.3)$$

Abhängig von den berechneten Kosten, wird der Fahrgast mit den geringsten Kosten c einem Fahrzeug zugeordnet. Die zuletzt genannte Formel wird ebenfalls für die Entscheidung des nächsten Ziels verwendet, wobei bereits im Fahrzeug befindliche Fahrgäste wie folgt berücksichtigt werden.

Sei $P = \{P_1, \dots, P_n\}$ eine Menge von aktuellen Fahrgästen, wobei $n \leq K$, mit K als Kapazität des Fahrzeugs, dann beschreibt das Tupel $P_i = \{d_i^z, t_i^w, t_i^f, d_i^g\}$ einen Fahrgast P_i . Dabei entspricht d_i^z der Distanz von der aktuellen Position des Fahrzeugs zum Ziel von P_i , t_i^w der bis zur Abholung verstrichenen Wartezeit von P_i , t_i^f der bisherigen Fahrzeit von P_i und d_i^g der insgesamt zurückzulegenden Distanz von P_i . Und sei $\omega_P = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4\}$ ein Gewichtungsvektor mit $\sum_{i=1}^4 \omega_i = 1$. Auch in diesem Fall sind die zuvor erwähnten Transformationen notwendig, wobei sich in diesem Fall die Formel der Distanztransformation nicht auf die Entfernung zur Abholposition bezieht, sondern auf die Entfernung vom Fahrzeug

zur Ablieferungsposition ($j \in \{z, g\}$ in Formel 4.1). Zusätzlich wird die aktuelle Fahrzeit berücksichtigt, die mit Formel 4.2 berechnet werden kann. Damit ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Kosten eines aktiven Fahrgastes P_k :

$$c(P_k) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (\omega_i \cdot P_{k,i}) \quad (4.4)$$

Die zuvor erwähnten Beispiele zur Beschreibung eines wartenden und eines aktiven Fahrgastes stellen eine mögliche Variante dar. Die entsprechenden Kostenfunktionen können dabei anhand geeigneter Parameter erweitert werden. So kann die Kostenfunktion, die einerseits zur Zuweisung oder Selektion des nächsten Fahrgastes verwendet wird und andererseits zur Bestimmung des nächsten Ziels dient, allgemein formuliert werden:

$$c(K_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot K_{k,i}) \quad (4.5)$$

Anhand der konkreten Beispiele wird das nächste Ziel D eines Fahrzeugs basierend auf den Formeln 4.3 und 4.4 bestimmt, wobei zwischen drei Fällen unterschieden wird:

$$D = \begin{cases} \text{Minimum}(c(P), c(R)), & \text{wenn } \forall P_i \in P \mid (S_{P_i}^z > d_{P_i}^z) \wedge (K_f > |P|) \\ \text{Minimum}(c(P)), & \text{wenn } K_f = |P| \\ \text{Minimum}(c(P)), & \text{mit } P_i \in P \mid S_{P_i}^z \leq d_{P_i}^z \end{cases} \quad (4.6)$$

Dabei entspricht K_f der Kapazität des Fahrzeugs, $S_{P_i}^z$ einem individuellen Schwellwert für die maximale Fahrzeit eines aktiven Fahrgastes P_i , beispielsweise abhängig von der zu fahrenden Distanz, und $d_{P_i}^z$ der aktuellen Fahrzeit von P_i . Im ersten Fall sind keine der Nebenbedingungen ($S_{P_i}^z > d_{P_i}^z \wedge (K_f > |P|)$) verletzt und das Fahrzeug entscheidet auf Basis der Kostenfunktion welches Ziel in Form einer Abhol- oder Ablieferungsposition angesteuert wird. Ist die Kapazität des Fahrzeugs erschöpft ($K_f = |P|$), wird das nächste Ziel anhand der entsprechenden Kostenfunktion lediglich aus den aktiven Fahrgästen gewählt und die Reservierungen werden zurückgestellt. Im dritten Fall, wenn die maximale individuelle Fahrzeit von mindestens einem Fahrgast überschritten wird, erfolgt die Auswahl des nächsten Ziels ausschließlich aus der Menge dieser Fahrgäste. Dadurch werden in diesem Beispiel als zusätzliche Nebenbedingungen Zeitfenster, in Form einer maximalen Fahrzeit, und die Kapazität des Fahrzeugs berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung dynamischer Anfragen und unter Verwendung des beschriebenen Verfahrens werden die Reservierungen unabhängig von ihren Zielen vom nächstgelegenen Fahrzeug abgeholt. Nächstgelegen bezieht sich in diesem Fall auf das Erreichen der Position mit den geringsten Kosten. Dadurch lassen sich dynamische Anfragen, in Form der Abholposition, schnell in eine bestehende Tour integrieren. Bei dieser Vorgehensweise werden aber auch Ablieferungspositionen von den jeweiligen Fahrzeugen berücksichtigt, sofern diese hinsichtlich der entstehenden Kosten akzeptabel sind. Nach diesem Schema wird verfahren, bis entweder die Kapazität des Fahrzeugs erschöpft ist oder die individuelle maximale Fahrzeit von einem der Fahrgäste erreicht ist.

Neben den aufgeführten Parametern lassen sich die Formeln 4.3 und 4.4 je nach Bedarf oder Optimierungskriterium ergänzen, so dass sich beispielsweise auch die aktuelle

Auslastung des Fahrzeugs oder die Anzahl der bereits vollzogenen Transfers eines Fahrgastes berücksichtigen lassen. Je nach Gewichtung lassen sich somit unterschiedliche Priorisierungen festlegen, die auch im Verlauf oder abhängig vom Bedarf angepasst werden können. Parallel dazu versuchen die Fahrzeuge, in einer zweiten Stufe untereinander zu kooperieren, indem Informationen, die unter anderem die Ablieferungsposition beinhalten, zwischen diesen ausgetauscht werden.

2. Phase - Kooperations- und Verbesserungsverfahren:

Die Vorgehensweise in der ersten Phase kann dazu führen, dass die Ablieferungspositionen der einzelnen Fahrgäste teilweise stark voneinander abweichen und somit keine optimale Ablieferung gewährleistet werden kann. Diesem Aspekt wird mit dem eingangs vorgestellten Prinzip der dynamischen Transferknoten entgegengewirkt. In der zweiten Phase findet somit die opportunistische Verbesserung der in der Zuordnungsphase gefunden Lösung unter Verwendung eines Ansatzes zur Kooperation zwischen den Fahrzeugen statt. Dabei wird versucht, anhand von ausgetauschten Informationen, eine bessere Fahrgastaufteilung und damit eine Optimierung des Tourenplans zu erreichen, wobei die Tatsache der teilweise starken räumlichen Verteilung der Ablieferungspositionen ausgenutzt wird. Im Hinblick auf die Verbesserung wird diese Phase als Optimierungsphase bezeichnet. Im Gegensatz zu fast allen anderen Arbeiten wird hierbei ein Transportauftrag, bestehend aus einem Abholpunkt und einem Ablieferungspunkt, nicht atomar behandelt, sondern erlaubt eine Aufspaltung und Verteilung der Aufgaben auf unterschiedliche Fahrzeuge, wobei zusätzlich zur Berücksichtigung der geltenden Vorrangbedingung ein Transfer stattfindet. Die Vorrangbedingung besagt dabei, dass ein Fahrgast zunächst abgeholt werden muss, bevor dieser zu der entsprechenden Ablieferungsposition befördert werden kann. Das Verfahren basiert dabei auf einer sogenannten DTN Verhandlung zwischen einzelnen Fahrzeugen und damit auf dem Austausch entsprechender Informationen. Diese Informationen setzen sich unter anderem aus den aktuellen Positionen der beteiligten Fahrzeuge sowie den jeweiligen Fahrgastlisten zusammen, die wiederum Angaben über die einzelnen Fahrgäste, wie beispielsweise deren Ablieferungsposition, enthalten. Eine Verhandlung besteht aus den folgenden 5 Schritten:

1. Kostenschätzung zur Ablieferung der aktuellen Fahrgäste
2. Clustering der Fahrgastlisten
3. Berechnung eines DTN
4. Kostenschätzung zur Ablieferung der neuen Fahrgastaufteilung
5. Bewertung der neuen Aufteilung im Vergleich zur aktuellen Aufteilung

Im 1. Schritt werden die Kosten für die Ablieferung der aktuellen Fahrgäste für die an der Verhandlung beteiligten Fahrzeuge geschätzt. Die Schätzung erfolgt lediglich auf Basis der aktuellen Fahrgäste und nutzt zur Auswahl des nächsten Ziels die letzten beiden Fälle aus Formel 4.6. Die Berechnung bezieht sich damit auf die iterative Auswertung von $\text{Minimum}(c(P))$, bis alle aktiven Fahrgäste in den jeweiligen Fahrzeugen den entsprechenden Ablieferungspunkt erreicht haben. Dabei werden sowohl die bestehenden Reservierungen als auch neue Transportanfragen bei der Schätzung zurückgestellt, um die Wartezeit an einem möglichen DTN zu minimieren und den Transfer für die im Fahrzeug verbleibenden

Fahrgäste so komfortabel wie möglich zu gestalten. Liegen die Fahrgastlisten der beteiligten

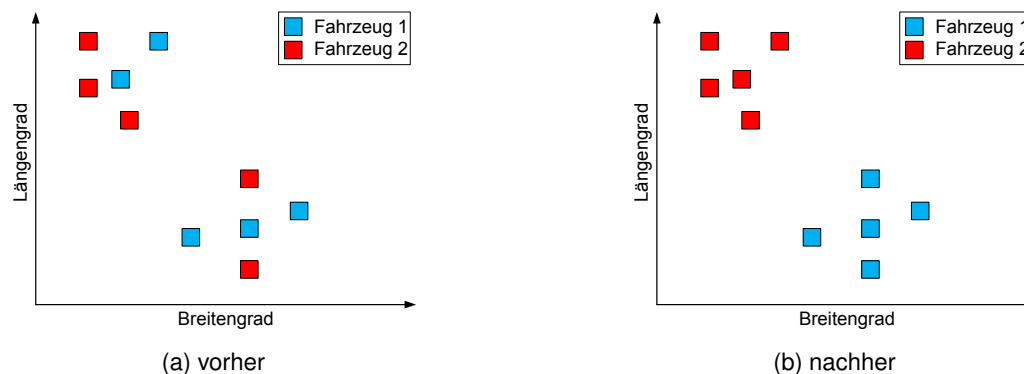


Abbildung 4.6: Fahrgastzuordnung vor und nach dem Clustering nach Breiten- und Längengrad, blau: Fahrzeug 1, rot: Fahrzeug 2

Fahrzeuge vor, werden die darin enthaltenen Fahrgäste im 2. Schritt beispielsweise anhand des Ablieferungspunktes zwei unterschiedlichen Gruppen zugeordnet. Abbildung 4.6 zeigt ein Beispiel für die Zuordnung zu zwei Fahrzeugen vor und nach diesem Schritt. Neben der Erzeugung von zwei unterschiedlichen Clustern besteht auch die Möglichkeit sämtliche Fahrgäste einem der Fahrzeuge zuzuordnen, was zu einer Optimierung der Fahrzeugauslastung bzw. einer Minimierung der benötigten Fahrzeuganzahl führt, sofern die Kapazitätsbeschränkungen nicht verletzt werden. Unabhängig davon müssen bei beiden Varianten Nebenbedingungen, insbesondere die Fahrzeugkapazität, berücksichtigt werden. Ergibt sich keine neue Aufteilung bzw. Zuordnung der aktuellen Fahrgäste zu den jeweiligen Fahrzeugen, entspricht die aktuelle Fahrgastkonfiguration bereits der lokal besten Lösung, und der Optimierungsschritt kann an dieser Stelle abgebrochen werden. Die Fahrzeuge verfahren anschließend weiter nach der vorgestellten Heuristik zur Abholung bzw. Ablieferung von Fahrgästen. Resultiert aus dem Clusteringsschritt eine andere Zuordnung der Fahrgäste, kann dies auf eine Optimierung im Vergleich zur bestehenden Lösung hindeuten. In diesem Fall wird im 3. Schritt und basierend auf den aktuellen Positionen der beteiligten Fahrzeuge ein DTN bestimmt, der zwei Bedingungen erfüllen muss:

1. Der DTN muss sich zwischen den beiden Fahrzeugen befinden und von diesen in annähernd gleicher Zeit erreichbar sein
2. Es muss sich dabei um einen Punkt handeln, der einen regelkonformen Transfer ermöglicht

Dabei wird der Mittelpunkt der Route zwischen den beteiligten Fahrzeugen bestimmt, wobei dieser Punkt in annähernd gleicher Zeit von beiden Fahrzeugen erreicht werden kann. Unter Verwendung von zusätzlichen Informationen, die einen regelkonformen Halt im Hinblick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen einschränken können, wird im Anschluss durch eine sukzessive Erweiterung des Radius und unter Verwendung eines Verfahrens zur Routenberechnung einer möglichen und für einen Transfer geeigneten Position gesucht. Im 4. Schritt können anschließend die Kosten unter Berücksichtigung des zusätzlichen Weges zum DTN und der notwendigen Transferzeiten mit Hilfe der vorgestellten Heuristik

geschätzt werden. Nach Abschluss dieser Schätzung kann entschieden werden, ob ein entsprechender Transfer sinnvoll ist. Dabei liegen im 5. Schritt die geschätzten Kosten für die alte und neue Zuordnung der Fahrgäste vor und lassen sich vergleichen. Bei diesem Prozess können entweder die Kosteneinsparungen für jedes der beiden Fahrzeuge einzeln oder die Gesamtkosteneinsparung beider Fahrzeuge zusammen betrachtet werden. Existieren mehrere Fahrzeuge, die für einen Fahrgastaustausch in Frage kommen, werden die Schritte 1 bis 4 für alle möglichen Kandidaten durchgeführt und bei dem Vergleich derjenige ausgewählt, bei dem die Einsparung maximal ist. Im Anschluss wird der DTN sowie die neue Zuordnung zu den entsprechenden Fahrzeugen bestätigt. Bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Transfer vollzogen wurde, werden weder neue Aufträge bzw. Anfragen akzeptiert noch werden wartende Fahrgäste abgeholt, um die Warte- und Transferzeiten so gering wie möglich zu halten. Nachdem die entsprechenden Fahrgäste ausgetauscht wurden, wird die eigentliche Diensterbringung mit der neuen Fahrgastkonfiguration fortgesetzt, wobei auch wieder neue Anfragen akzeptiert und Reservierungen berücksichtigt werden.

Durch die beschriebene Vorgehensweise eignet sich dieser Ansatz insbesondere für dynamische Tourenplanungsprobleme, da neue Anfragen umgehend auf entsprechende Fahrzeuge aufgeteilt werden können, ohne dass eine möglicherweise aufwendige Neuberechnung des Tourenplans durchgeführt werden muss. Allerdings bleibt zu berücksichtigen, dass der Informationsaustausch und die Nutzung der Transfermöglichkeit sinnvoller sind, wenn die Entfernung zwischen den Fahrzeugen nicht zu groß ist, da ansonsten die Kosten für den Transfer das mögliche Einsparungspotenzial schmälern würden. Eine zu große Distanz führt dabei auch zu längeren Wartezeiten, da vorhandene Reservierungen bei der Durchführung eines Transfers zurückgestellt werden. Bei diesem Prinzip handelt es sich um eine lokale Optimierungsstrategie durch Kooperation in Form von Fahrzeugwechseln. Somit verwendet das vorgestellte Verfahren zur kooperativen Tourenplanung nach der Klassifikation in der initialen Phase ein heuristisches Konstruktionsverfahren, bei dem abhängig von unterschiedlichen Parametern eine Zuordnung der Fahrgäste erfolgt. Aufbauend auf der initialen Phase wird schließlich das Prinzip der dynamischen Transferknoten zur Verbesserung genutzt und stellt damit einen neuen Ansatz der heuristischen Intertour Verbesserungsverfahren dar, bei dem die ansonsten atomaren Transportaufträge durch einen Fahrzeugwechsel aufgespaltet werden. Die Teilaufträge in Form der Abholung und der Ablieferung unterliegen dabei einer Vorrangbedingung, bei der die Abholung vor der Ablieferung erfolgt. Dazwischen besteht die Möglichkeit Fahrzeugwechsel durchzuführen, so dass der zweite Teilauftrag, die Ablieferung, von einem anderen Fahrzeug durchgeführt wird. Zur Initiierung der Optimierung durch DTNs können zwei unterschiedliche Kooperationsmechanismen genutzt werden, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Kooperationsmechanismen

Im Zusammenhang mit dieser Optimierungsstrategie sind zwei unterschiedliche Mechanismen zur Initiierung der Kooperation entwickelt worden. Dabei handelt es sich um einen ereignisbasierten und einen periodischen Mechanismus.

Der ereignisbasierte Mechanismus basiert auf der Idee, dass die Optimierungsphase nur durchgeführt werden muss, wenn sich der Kontext des Fahrzeugs verändert hat. Der Kontext bezieht sich dabei auf eine Änderung der Fahrgastkonfiguration und damit auf die Ankunft an

einer Abholposition, an der ein neuer Fahrgast aufgenommen wird. Nachdem ein Fahrgast abgeholt wurde, existiert eine neue Ablieferungsposition, die wiederum den Clusterprozess der Optimierungsphase beeinflussen kann. Daher wird eine entsprechende DTN Anfrage initiiert, die den beschriebenen Prozess zur Folge hat. Um den Grad der Optimierung zu verstärken, sollte bei einer geringen Fahrzeugdichte die Reichweite bzw. das Gebiet in dem die Informationen ausgetauscht werden vergrößert werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, dass sich potenzielle Kooperationspartner in einer entsprechenden Entfernung zueinander befinden.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Initiierung der Optimierungsphase beim periodischen Mechanismus unabhängig vom Kontext bzw. von der aktuellen Fahrgastkonfiguration in regelmäßigen Abständen. Diesem Mechanismus liegt die Annahme zu Grunde, dass die Fahrzeuge laufend die Position verändern und sich dadurch auch bei einer geringen Kommunikationsreichweite im Laufe der Zeit eine kürzere Distanz zwischen möglichen Kooperationspartnern ergibt. Im Gegensatz zur ereignisbasierten Variante wird in diesem Fall durch die Bewegung der Fahrzeuge die Wahrscheinlichkeit zum Auffinden geeigneter Kooperationspartner erhöht.

4.4 Geostatistische Verfahren für räumliche Daten

Eine wesentliche Grundlage im Zusammenhang mit Systemen zur Umweltüberwachung ist die Verfügbarkeit flächendeckender Informationen mit einer möglichst hohen Genauigkeit und Granularität. Im Zusammenhang mit geografischen Messdaten über die Luftverschmutzung wird häufig auf unterschiedliche Modelle, wie Proximity Modelle, Interpolationsmodelle, Regressionsmodelle, Dispersionsmodelle oder meteorologische Modelle zurückgegriffen, die in [122] verglichen wurden. Je nach Modell und den darauf basierenden Verfahren werden verschiedene Anforderungen an den Detailgrad und die benötigten Datenquellen gestellt, um eine geeignete Beschreibung der Luftverschmutzung zu erreichen. Einige Verfahren nutzen hierfür lediglich die tatsächlichen Messwerte, wohingegen andere auf verwandte und korrelierende Datensätze zurückgreifen, die einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Luftverschmutzung haben, wie beispielsweise Umgebungsmerkmale in Form von Straßen, Parks, Bebauungsplänen oder Informationen über die Wetterlage einschließlich der Windgeschwindigkeit, -richtung und Temperatur.

Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich in diesem Zusammenhang auf Interpolationsverfahren, wobei hauptsächlich Messdaten, die mit Hilfe geeigneter Sensoren erfasst werden, als Datenquelle bzw. -grundlage verwendet werden. Das wesentliche Ziel dieser Verfahren ist die Bestimmung eines zusammenhängenden Messfeldes, bei der für jeden Punkt im Untersuchungsgebiet ein realer oder interpolierter Messwert angegeben werden kann.

Auf dem Gebiet der Bearbeitung, Verwaltung und Interpretation von räumlichen und zeiträumlichen Messdaten existieren unterschiedliche Ansätze, die sich zunächst in deterministische und stochastische Verfahren unterteilen lassen. Deterministische Verfahren arbeiten unter Verwendung festgelegter mathematischer Funktionen und erlauben keine Aussage über die Qualität der Schätzung. Im Gegensatz dazu basieren stochastische Verfahren auf Zufallspro-

zessen, wobei die tatsächlich vorhandenen Messwerte als konkrete Realisierung eines solchen Prozesses gesehen werden. Ein Zufallsprozess besteht aus einzelnen Zufallsvariablen zusammen mit einer entsprechenden Verteilungsfunktion, wodurch Aussagen über die Genauigkeit der Schätzwerte getroffen werden können. Zusätzlich kann noch zwischen der globalen und der lokalen Interpolation unterschieden werden, wobei die globale Variante für die Schätzung an unbekannten Stellen sämtliche verfügbaren Messwerte berücksichtigt, wohingegen lokale Verfahren lediglich die umliegenden Messpunkte nutzen und daher auf einem räumlich begrenzten Gebiet arbeiten. Des Weiteren kann zwischen exakten und approximierten Ansätzen zur Interpolation unterschieden werden. Bei einer exakten Schätzung werden die tatsächlichen Messwerte unmittelbar im Interpolationsergebnis übernommen, wobei Messfehler oder große Abweichungen zu sogenannten Spikes in den interpolierten Daten führen können. Bei den Näherungsverfahren werden im Gegensatz dazu sämtliche Punkte berücksichtigt, unabhängig davon, ob es sich um einen tatsächlich gemessenen oder um einen zu schätzenden Wert handelt.

4.4.1 Stochastischer Prozess

Verfahren zur Schätzung von Messwerten an unbeobachteten Positionen basieren auf einem stochastischen Prozess, wobei sogenannte Umwelt- oder Zufallsvariablen die Grundlage bilden. Berücksichtigen diese das räumliche Verhalten spricht man auch von regionalisierten Variablen [155], die über den Raum kontinuierlich sind und sich wie folgt formal beschreiben lassen:

$$Z(x) = Z^*(x) + \epsilon'(x) + \epsilon''(x) \quad (4.7)$$

Dabei stellt $Z^*(x)$ eine deterministische und $\epsilon'(x)$ eine stochastische Komponente dar. Mit $\epsilon''(x)$ wird ein Rauschsignal, beispielsweise in Form eines Messfehlers, beschrieben. Der Ort, der sich neben der Position zusätzlich auf den Zeitpunkt der Messung bezieht, wird mit x bezeichnet. Ein stochastischer Prozess bezieht sich dabei auf ein räumliches Untersuchungsgebiet A , dem eine Menge von Umweltvariablen zugeordnet sind. Formal lässt sich dieser stochastische Prozess folgendermaßen darstellen: $\{Z(x), x \in A\}$ und bildet die Grundlage für geostatistische Verfahren.

Die tatsächlichen Messwerte an den Orten x_1, \dots, x_n werden als konkrete Realisierung des Prozesses mit $z(x_1), \dots, z(x_n)$ beschrieben. Durch einen Interpolator werden die regionalisierten Variablen als $\hat{z}(x)$ für alle $x \in A$ geschätzt, wobei der Autokorrelationseffekt ausgenutzt wird. Dieser besagt, dass räumlich voneinander getrennte Punkte miteinander in Beziehung stehen. Nach [103] bedeutet dies, dass Messwerte an Punkten, die nahe beieinander liegen einen ähnlicheren Wert aufweisen als weiter voneinander entfernte.

4.4.2 Inverse Distance Weighting

Ein einfaches deterministisches Interpolationsverfahren ist Inverse Distance Weighting (IDW) [292]. Hierbei wird für jeden Punkt x_0 ein Messwert durch eine gewichtete Linearkombination der umliegenden Messpunkte x_i berechnet. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus dem Abstand zwischen dem Punkt x_0 und den Punkten x_i , der durch die Distanzfunktion

$dist : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ modelliert wird. Der interpolierte Wert $\hat{z}(x_0)$ ergibt sich dann aus:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_0) \cdot z(x_i) \quad (4.8)$$

Dabei beschreibt λ_i den räumlichen Zusammenhang zwischen x_0 und x_i in Form eines Gewichtungsfaktors der Form:

$$\lambda_i(x_0) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{dist^\beta(x_0, x_i)}} \quad \text{mit } \beta > 1 \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_0) = 1 \quad (4.9)$$

Hierbei kann mit dem Exponent β die Abnahme Gewichtung der umliegenden Punkte im Verhältnis zur Entfernung beeinflusst werden.

IDW ist ein exaktes Interpolationsverfahren und kann sowohl global als auch lokal angewendet werden. Der Vorteil liegt in den geringen Anforderungen an die Rechenleistung, da keine aufwendigen Vorberechnungen notwendig sind. Allerdings wird durch den Gewichtungsfaktor ausschließlich die Entfernung berücksichtigt und erlaubt daher keine spezifischen Eigenschaften bezüglich des räumlichen und zeitlichen Verhaltens von Luftschadstoffen. Außerdem erlaubt IDW keine Aussagen über die Genauigkeit der interpolierten Daten im Gegensatz zu Kriging Verfahren, die im Folgenden erläutert werden.

4.4.3 Kriging zur räumlichen Interpolation

Kriging [136, 137, 155] ist ein stochastisches Interpolationsverfahren, das eine Schätzung von Messwerten an unbeobachteten Punkten unter Verwendung eines stochastischen Prozesses erlaubt. Der räumliche Zusammenhang zwischen den Punkten wird über ein Semivariogramm beschrieben, mit dem das räumliche Verhalten von Luftschadstoffen modelliert werden kann. Dadurch ist neben den Schätzungen von Messwerten an unbeobachteten Orten auch eine Aussage über die Genauigkeit der Schätzung möglich. Die Randbedingungen bei der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren beim Kriging sind:

- Unverzerrtheit: Der Schätzfehler soll im Mittel gleich 0 sein.
- Optimalität: Die Varianz des Schätzfehlers soll minimal sein.

Basierend auf dem stochastischen Prozess werden in diesem Abschnitt zwei Kriging Varianten zur Bestimmung von Messwerten an unbekannten Orten vorgestellt. Wie bereits angesprochen, wird dabei das räumliche Verhalten, oder vielmehr der räumliche Zusammenhang der tatsächlichen Messdaten ausgenutzt, der mit Hilfe der Semivarianz beschrieben wird. Semivarianzen für unterschiedliche Abstände können dabei in einem Semivariogramm dargestellt werden. Dabei bildet ein Semivariogramm die Grundlage für Kriging Verfahren, dessen Erstellung im Folgenden genauer beschrieben wird.

4.4.3.1 Semivarianz und Semivariogramm

Die Semivarianz γ beschreibt den Grad der räumlichen Abhängigkeit und definiert die gerichtete, quantitative Änderung einer Variablen. Sie wird aus den halben, quadrierten Differenzen zwischen den Werten einzelner Punktepaares, die innerhalb einer Entfernungsklasse h liegen, gebildet:

$$\gamma = \frac{1}{2} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (4.10)$$

Die so bestimmten Semivarianzen lassen sich in einem h-Streudiagramm eintragen, wie in Abbildung 4.7a veranschaulicht und sind ein Maß für die mittlere Streuung der Werte einer Zufallsvariable. Diese verhält sich indirekt proportional zum räumlichen Zusammenhang. Mit Bezug auf das geostatistische Modell wird hierbei die Annahme getroffen, dass der räumliche Zusammenhang der Daten nicht von der geografischen Lage des Ortes abhängt, sondern lediglich von der relativen Lage der Orte zueinander in Form der Distanz und gegebenenfalls der Richtung. Somit ist die Varianz der Differenzen nur abhängig vom Lagvektor h : $Var[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h)$. Zusätzlich ist der Erwartungswert (E) aller Zufallsvariablen gleich: $E[Z(x)] = m, \forall x \in A$ und m konstant [106]. Sind diese Eigenschaften erfüllt, spricht man von einem intrinsisch stationären Prozess.

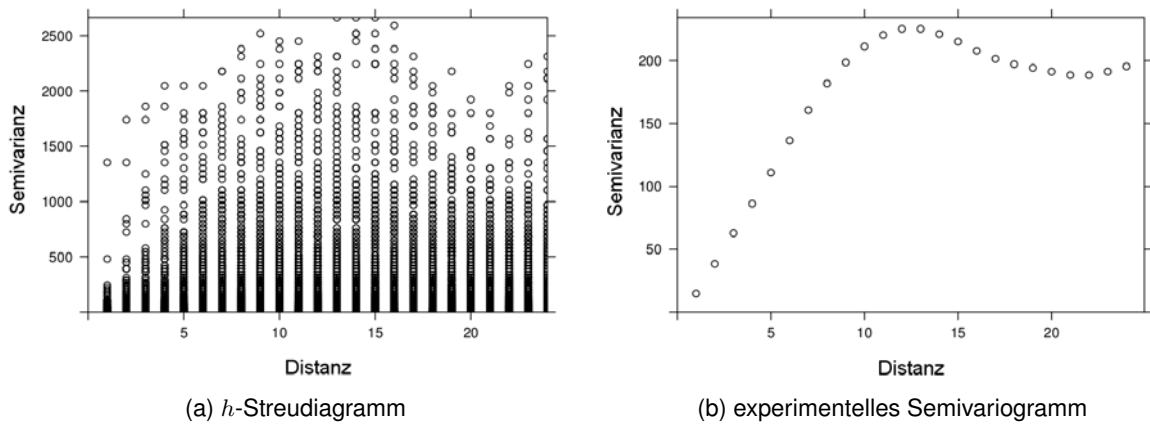


Abbildung 4.7: h-Streudiagramm und daraus bestimmtes Semivariogramm

Basierend auf den Semivarianzen bildet das Semivariogramm einen Kennwert des stationären stochastischen Prozesses und ist in der Regel eine monoton wachsende Funktion. Ein Semivariogramm ist eine Funktion des Abstandsvektors h , wobei diese für jeden Abstand unter Verwendung eines Schätzers $\hat{\gamma}(h)$ bestimmt wird:

$$\hat{\gamma}(h) := \frac{1}{2|N(h)|} \sum_i^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4.11)$$

mit

$$N(h) = \{(x_i, x_j), |h| - \epsilon < |x_i - x_j| < |h| + \epsilon \wedge \phi(h) - \delta < \phi(x_i - x_j) < \phi(h) + \delta\} \quad (4.12)$$

Dabei ist n die Anzahl der Messwerte der Gruppe von Punkten mit dem Abstand in einer ϵ Umgebung von h . Der durch ϕ beschriebene Winkel mit einer Toleranz δ ermöglicht zusätzlich eine Unterteilung in Abhängigkeit von der Richtung der Zufallsvariablen zueinander. $Z(x_i)$ ist die Größe der regionalisierten Variablen am Ort i und $Z(x_i + h)$ die Größe einer Variable mit dem Abstand h zu Ort i . Ein Semivariogramm wird als isotrop bezeichnet, wenn sich die räumliche Abhängigkeit lediglich auf die Entfernung bezieht und $\gamma(h) = \gamma(|h|)$ gilt. Anisotrope Semivariogramme sind dagegen auch von der Richtung oder dem Winkel ϕ des Lagvektors h abhängig. Nimmt der räumliche Zusammenhang zweier Zufallsvariablen ab, so steigt die

Varianz der Differenz der beiden in Form des Semivariogramms an und nähert sich dabei asymptotisch einem Schwellwert an, der auch als Sill bezeichnet wird. Der Abstand h , an dem der Schwellwert erreicht wird, ist die Aussagereichweite oder Range. Ist die Aussagereichweite in Form des Abstands zweier Zufallsvariablen überschritten, so kann von deren räumlicher Unabhängigkeit ausgegangen werden. Liegt der Schnittpunkt des Semivariogramms über dem Ursprung, so wird diese Abweichung als Nuggeteffekt bezeichnet. Mit Hilfe des Schätzers aus Formel 4.11 kann aus den gesammelten Messwerten ein experimentelles Semivariogramm geschätzt werden, wie in Abbildung 4.7b veranschaulicht.

Aufbauend auf dem experimentellen Semivariogramm, welches den räumlichen Zusammenhang in Abhängigkeit des Abstands der tatsächlich gemessenen Werten widerspiegelt und somit auf einer Stichprobe basiert, wird ein theoretisches Semivariogramm bestimmt. Sofern von einem isotropen Prozess ausgegangen werden kann, existieren hierfür einige Funktionen, die häufig in der Praxis zum Einsatz kommen. Diese Funktionen besitzen mehrere Modellparameter, die bei der Erstellung des theoretischen Semivariogramms so angepasst werden, dass die daraus resultierende Funktion das experimentelle Semivariogramm bestmöglich approximiert. Modellparameter sind dabei beispielsweise der Nuggeteffekt, der Sill oder die Aussagereichweite. Die wichtigsten Funktionen sind in Tabelle 4.4 zusammen mit einem grafischen Beispiel dargestellt.

Name	formale Definition	grafische Darstellung
Beschränkt lineares Modell	$\gamma(h) = \begin{cases} n & h = 0, \\ (s - n)\left(\frac{h}{r}\right) + n & h \leq r, \\ s & h > r \end{cases}$	
Sphärisches Modell	$\gamma(h) = \begin{cases} n & h = 0, \\ (s - n)\left(\frac{3h}{2r} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{r^3}\right) + n & h \leq r, \\ s & h > r \end{cases}$	
Exponentielles Modell	$\gamma(h) = \begin{cases} n & h = 0, \\ (s - n)(1 - \exp(-\frac{ah}{r})) + n & h > 0 \end{cases}$	
Gaußsches Modell	$\gamma(h) = \begin{cases} n & h = 0, \\ (s - n)(1 - \exp(-\frac{ah^2}{r^2})) + n & h > 0 \end{cases}$	

Tabelle 4.4: Verbreitete isotrope Semivariogrammmodelle, nach [45, 321]

Zur Berechnung eines theoretischen Semivariogramms, dem sogenannten Variogram Fitting, können verschiedene Methoden angewendet werden. Das grundlegende Prinzip basiert zunächst auf der Auswahl eines initialen Semivariogrammmodells (vgl. Tabelle 4.4), bei dem anschließend die entsprechenden Parameter in einem iterativen Prozess angepasst werden, bis eine geeignete Approximation oder ein entsprechendes Abbruchkriterium erreicht wurde. In der Praxis wird dieser Prozess in der Regel manuell begleitet und durch einen Benutzer gesteuert [107]. Alternativ kann auch ein vollautomatisches Variogram Fitting verwendet werden, wofür ein geeigneter Schätzer benötigt wird [103]. Für das automatische Variogram Fitting kommen in der Regel Methoden der kleinsten Quadrate, Maximum Likelihood Ansätze

oder robuste Verfahren zum Einsatz, die in [45] näher beschrieben sind.

Sei $(h_i), i = 1..n$ eine Folge der im experimentellen Semivariogramm auftretenden diskreten h -Werte. Auf Grund der unterschiedlichen Anzahl an Werten von $N(h_i)$ (vgl. Formel 4.12) für die unterschiedlichen Entfernungsklassen, variieren auch die Konfidenzintervalle von $\hat{\gamma}(h_i)$. Bei der gewichteten Methode der kleinsten Quadrate werden die Modellparameter $\lambda \in \mathbb{R}^n$ approximiert, so dass

$$S = \sum_{i=1}^k \frac{[2\hat{\gamma}(h_i) - 2\gamma(h_i; \lambda)]^2}{Var[2\hat{\gamma}(v)]} \quad (4.13)$$

minimiert wird. Ausgehend von einer identischen Anzahl an Punkten in einer Entfernungsklasse ist die Varianz einer Schätzung doppelt so groß wie die Semivarianz $2\hat{\gamma}(h_i)$ und im Allgemeinen unbekannt [296]. Diese kann aber beispielsweise über

$$Var[2\hat{\gamma}(h_i)] \simeq 2 \frac{[2\gamma(h_i; \lambda)]^2}{N(h_i)} \quad (4.14)$$

geschätzt werden. Hierbei werden die unterschiedlichen Konfidenzintervalle von $\hat{\gamma}(h_i)$ berücksichtigt, wobei kleine h stärker gewichtet als große [44]. Ein mit den Daten aus Abbildung 4.7b gefittetes isotropes sphärisches Semivariogramm ist in Abbildung 4.8 dargestellt, bei dem sich die Kurve bestmöglich dem Verlauf der Datenpunkte anpasst. Diese steigt zunächst fast linear an und acht schließlich ab. Bei einer Distanz von etwa 13 wird der Schwellwert erreicht, der die obere Schranke des Semivariogramms bildet. Für ein automatisches Variogram Fitting ist es zudem empfehlenswert, möglichst einfache Variogrammodelle zu verwenden. Je mehr Modellparameter ein Variogramm besitzt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Prozess des iterativen Variogram Fittings in einem lokalen Minimum endet und somit fehlerhafte Ergebnisse liefert [29, 103].

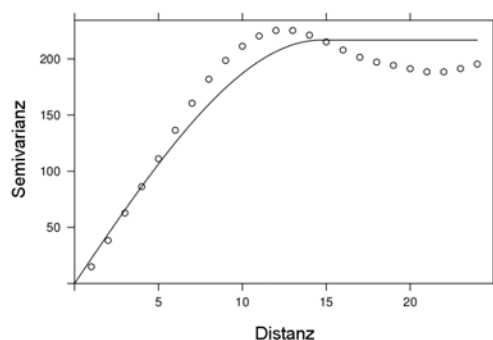


Abbildung 4.8: Sphärisches Semivariogramm nach automatisiertem Fitting

In diesem Zusammenhang bieten einige statistische Softwareprodukte eine entsprechende Funktionalität, wie beispielsweise die variokit Funktion im geoR Paket für die Statistiksoftware R [54]. Andere Methoden basieren auf der stochastischen Optimierung, wie das varfit Programm [140, 265], wobei versucht wird eine Kostenfunktion durch zufälliges durchprobieren von Werten eines Parameters bei jeder Iteration zu minimieren. In [73] wird zu diesem Zweck ein Simulated Annealing Verfahren (vgl. Abschnitt 4.3.2.3) verwendet.

In den folgenden Abschnitten werden Kriging Varianten vorgestellt, die die eben vorgestellten Semivariogramme zur räumlichen Interpolation nutzen.

4.4.3.2 Ordinary Kriging

Die im Folgenden vorgestellte Variante wird als gewöhnliches Kriging (englisch: Ordinary Kriging) bezeichnet und zur Interpolation von Punktdaten verwendet. Bei diesem Verfahren werden anhand einer Reihe von Messwerten $z(x_1), \dots, z(x_n)$ an bekannten Positionen

x_1, \dots, x_n Messwerte an allen unbekannten Positionen geschätzt. Dabei wird ein intrinsisch stationärer Prozess mit einem global konstanten Erwartungswert μ angenommen. Darüber hinaus wird für die Umweltvariablen näherungsweise eine Normalverteilung gefordert. Liegt diese nicht vor, so sind die Daten entsprechend zu transformieren, beispielsweise mit Hilfe einer Logtransformation [261, 321].

Um den Wert z_{x_0} an einem unbeobachteten Ort x_0 anhand der bekannten Beobachtungen zu schätzen, wird beim Ordinary Kriging der folgende Schätzer verwendet:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad (4.15)$$

Die Gewichte des sogenannten Krige Schätzers für einen Punkt x_0 werden so bestimmt, dass der Schätzfehler $(F(x_0) = \hat{Z}(x_0) - Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) - Z(x_0))$ im Mittel gleich 0 ist: $E[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0$, was der Nebenbedingung entspricht und die Varianz des Schätzfehlers minimal ist: $Var[F(x_0)] \rightarrow Min \{F(x_0), \lambda_1, \dots, \lambda_n : \text{reelle Zahlen}\}$. Nach [106] kann die Nebenbedingung vereinfacht werden, wobei die Stationarität des stochastischen Prozesses und die Linearität des Erwartungswertes ausgenutzt werden:

$$0 = E[Z(x_0) - \hat{Z}(x_0)] = E[Z(x_0)] - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot E[Z(x_i)] \right) = E[Z(x_0)] \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) \quad (4.16)$$

Daraus folgt: $1 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$. Die geschätzte Varianz entspricht dem Quadrat der Abweichung um den Erwartungswert und lässt sich unter Verwendung der Semivarianz wie folgt umformen:

$$Var[\hat{Z}(x_0)] = E[(\hat{Z}(x_0) - Z(x_0))^2] = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) \quad (4.17)$$

mit $\gamma(x_i, x_j) = \gamma(x_j - x_i)$. Das sich daraus ergebende, lineare Gleichungssystem lässt sich übersichtlicher in Matrixschreibweise darstellen:

$$C \cdot \lambda = b \quad (4.18)$$

wobei

$$C = \begin{pmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \cdots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \cdots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} b = \begin{pmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Die Gewichtungsfaktoren λ für den unbeobachteten Punkt x_0 sind zunächst unbekannt und können durch Invertieren der Matrix C berechnet werden:

$$\lambda = C^{-1} \cdot b \quad (4.20)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Gewichte für jeden unbeobachteten Punkt und den dafür zu schätzenden Wert erneut zu berechnen sind.

4.4.3.3 Block Kriging

Ordinary Kriging ist zunächst nur zur Interpolation von Punktdaten geeignet, wobei in der Praxis zwar die Messwerte an einzelnen Messpunkten erfasst werden, das zu interpolierende Messfeld aber meist eine Fläche ist. Diese Fläche kann durch eine geeignete Rasterung zusätzlich partitioniert werden.

Der gesuchte interpolierte Messwert ist dabei nicht ein einzelner Punkt, sondern der Durchschnitt aller Punkte einer Rasterzelle, die im Folgenden als Block bezeichnet wird. Hierfür wäre die Interpolation mehrerer Punkte innerhalb eines Blocks und die anschließende Bildung des arithmetischen Mittelwerts ein naiver Ansatz. Sofern quadratische Blöcke vorliegen, können die Punkte in beiden Dimensionen gleichmäßig n Positionen zugeordnet werden, so dass sich je nach Auflösung n^2 zu interpolierende Punkte pro Block ergeben. Allerdings ist dieser Ansatz ineffizient, da die benötigte Rechenleistung quadratisch mit der Auflösung der Blöcke zunimmt und entsprechend mehr Punkte interpoliert werden.

Beim Block Kriging wird die folgende Modifikation des Gleichungssystems vom Ordinary Kriging vorgenommen:

$$\hat{Z}(B_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (4.21)$$

mit B_0 als zu interpolierender Block und

$$Var[\hat{Z}(B_0)] = E[(\hat{Z}(B_0) - Z(B_0))^2] = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, B_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \bar{\gamma}(B_0, B_0) . \quad (4.22)$$

Die durchschnittliche Semivarianz $\bar{\gamma}(x_i, B)$ zwischen einem Punkt und einem Block ist:

$$\bar{\gamma}(x_i, B) = \frac{1}{|B|} \int_B \gamma(x_i, x) dx \quad (4.23)$$

Die Semivarianz zwischen zwei Blöcken B_k und B_l ergibt sich aus:

$$\bar{\gamma}(B_k, B_l) = \frac{1}{|B_k||B_l|} \int_{B_k} \int_{B_l} \gamma(x, x') dx dx' . \quad (4.24)$$

Anstatt die Anzahl der zu interpolierenden Punkte zu erhöhen, wird bei diesem Verfahren lediglich das Gleichungssystem angepasst. Dabei wird deutlich weniger Rechenleistung benötigt als beim naiven Ansatz [321]. Abschließend wird noch ein Verfahren aus der Gruppe der Regressionsmodelle vorgestellt. Das Land Use Regression Verfahren basiert auf Umgebungsmerkmalen und ermöglicht dabei eine zusätzliche Berücksichtigung dynamischer Messwerte.

4.4.4 Land Use Regression Verfahren

Die stark auf Geodaten basierende Land Use Regression ist ein Verfahren, bei dem die Verschmutzungsdaten einer Position anhand von Umgebungsmerkmalen bestimmt werden. Diese Verfahren nutzen unterschiedliche Modelle zur Beschreibung der räumlichen

Gegebenheiten und werden häufig zur Modellierung von Verkehrsschadstoffen verwendet [283].

Ein Land Use Regressionsmodell setzt sich in der Regel aus unterschiedlichen Prädiktorvariablen zusammen, die entweder eine (aktive) Schadstoffquelle, wie die Verkehrsdichte auf einem bestimmten Straßentyp oder die Emissionen eines Industriegebiets, repräsentieren oder Ausbreitungsbedingungen, beispielsweise in Form der Höhe oder Windrichtung, beschreiben. Jede dieser Variablen kann dabei abhängig vom Vorzeichen entweder einen positiven oder negativen Einfluss auf das Modell ausüben. So hat eine Hauptstraße einen positiven oder verstärkenden Effekt auf die Schadstoffkonzentration, wohingegen einer Grünfläche ein negativer oder abschwächender Effekt zugewiesen werden kann. Zudem können unterschiedliche Zonen oder Gebiete des räumlichen Einflusses für jede Variable definiert werden, wobei diese kontinuierlich sein müssen und sich nicht überlappen dürfen.

Eine Form des Land Use Regression Modells für Schadstoffe kann wie folgt beschrieben werden:

$$K_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (\beta X_{ijk})_{jk} + \epsilon \quad (4.25)$$

Dabei beschreibt K_i die Schadstoffkonzentration am Ort i und β_0 ist eine Konstante, mit der beispielsweise die Hintergrundbelastung spezifiziert werden kann. β_{jk} beschreibt die Gewichtung der abhängigen Variable j für ein Gebiet k . X_{ijk} ist der Wert der entsprechenden Variable, die für ein Gebiet k um einen Ort i bestimmt wurde und ϵ beschreibt einen Fehlerwert. Dabei kann ein Gebiet k individuell für jede Variable j bestimmt werden, wobei verschiedenen Variablen auch unterschiedliche Gebiete zugeordnet werden können.

In Anlehnung an das Small Area Variations in Air Quality and Health (SAVIAH) Projekt [26, 25] soll die Verwendung der Land Use Regression beispielhaft verdeutlicht werden. Die wesentlichen Prädiktorvariablen repräsentieren dabei das Verkehrsaufkommen und die Landnutzung, bei der zwischen industriellen und dicht bebauten Flächen unterschieden wird. Zunächst wurden für das Verkehrsaufkommen ($Tvol$) Gebiete mit einer maximalen Ausdehnung von 300 Metern berücksichtigt, wobei der Einfluss auf die NO_2 Konzentration zwischen 0 und 40 Metern 15 mal höher gewichtet wurde als bei einem Abstand von 40 bis 300 Metern:

$$Tvol_{i,300} = 15 \cdot Tvol_{i,0-40} + Tvol_{i,40-300}$$

Bei der Flächennutzung wurde ein 1,5 facher Einfluss der dicht bebauten Gebiete (HDH) gegenüber industriell genutzten Flächen (Ind) jeweils zwischen 0 und 300 Metern angenommen.

$$Land_{i,300} = 1,5 \cdot HDH_{i,1,0-300} + Ind_{i,1,0-300}$$

Des Weiteren wurde die Höhe über Normal Null (Alt) und die Höhe des Sensors über dem Boden ($SAlt$) berücksichtigt, woraus sich das folgende Regressionsmodell ergibt:

$$K_i^{NO_2} = \beta_0 + \beta_1 \cdot Tvol_{i,300} + \beta_2 \cdot Land_{i,300} + \beta_3 \cdot Alt_i + \beta_4 \cdot SAlt_i$$

Die Koeffizienten β_1, \dots, β_4 unterscheiden sich dabei allerdings für unterschiedliche Städte und ergeben sich aus einer weiteren Regressionsanalyse, weshalb hier auf eine genaue

Angabe verzichtet wird. In einer geeigneten Bestimmung der jeweiligen Gewichte (β_i), mit denen auch der räumliche Einfluss der jeweiligen Prädiktorvariable bestimmt wird und den umfangreichen und detaillierten Informationen über das Verkehrsaufkommen an bestimmten Straßen, sowie die Art der entsprechenden Fahrzeuge, die Geländenutzung in Form von Flächennutzungsplänen, den Bebauungsgrad und weitere geografische Daten, liegt auch die Schwierigkeit und Komplexität dieser Verfahren. In der Regel sind für die Erstellung geeigneter Modelle einerseits eine präzise Datengrundlage und andererseits Experten- und Domänenwissen notwendig.

4.5 Zusammenfassung

Als Grundlage zur Kooperation wurden in Abschnitt 4.1 wurden einige drahtlose Kommunikationstechnologien behandelt, die für den Austausch von Informationen und Daten verwendet werden können. Dabei wurden sowohl zellulare infrastrukturbasierte Technologien also auch Möglichkeiten für den spontanen Datenaustausch vorgestellt und bezüglich der Abdeckung oder Reichweite, der Datenrate und der Latenzzeit gegenübergestellt. Neben den Technologien wurden zwei grundlegende Modelle verteilter Kommunikation im Zusammenhang mit der Bereitstellung und Nutzung von Diensten beschrieben und diskutiert. Unter Verwendung der entsprechenden Kommunikationstechnologien, können Dienste und Anwendungen genutzt werden, um eine gemeinschaftliche Zusammenarbeit einzelner Entitäten zur Umsetzung kooperativer Mobilität zu ermöglichen.

In Abschnitt 4.2 wurden Möglichkeiten zur Verwaltung geografischer Informationen aufgezeigt. Zum einen wurde dabei auf den Bereich der Geoinformationssysteme eingegangen, und zum anderen wurden Verfahren besprochen, mit denen entsprechende Informationen effizient verwaltet werden können. Hierbei erlaubt der Einsatz geeigneter Datenbanktechnologien eine skalierbare Verwaltung, Organisation und Abfrage geografischer Informationen, die sich im Zusammenhang mit Verkehrssystemen auf Straßen- oder allgemeiner auf Transportnetze beziehen. Die hierarchische Unterteilung von Räumen ermöglicht durch die entstehende Strukturierung einen effizienten Zugriff auf geografische Informationen und ist insbesondere für die Nutzung mobiler Endgeräte, die über beschränkte Ressourcen verfügen, relevant.

Ein weiterer Aspekt mit Bezug zu Verkehrssystemen und vor allem für den Transport von Personen oder Waren ist die Routen- oder Tourenplanung, die im Abschnitt 4.3 behandelt wurde. Die Basis für eine entsprechende Planung bilden Verkehrsnetze, die sich als Graph modellieren lassen und somit eine Berechnung kostengünstiger Wege mit Hilfe mathematischer Verfahren ermöglichen. Neben der Berechnung einzelner Routen existieren auch komplexere, kombinatorische Problemstellungen, die sich auf den Transport von und zu mehreren unterschiedlichen Bestimmungsorten beziehen. In diesem Zusammenhang wurde neben den gängigen Lösungsansätzen ein neuer kooperativer Ansatz vorgestellt, der sich insbesondere mit hoch dynamischen Tourenplanungsproblemen befasst. Im Rahmen bedarfsorientierter Transportsysteme kooperieren einzelne Fahrzeuge untereinander, um nach dem eingeführten Prinzip der dynamischen Transferknoten eine Optimierung im Vergleich zu den aktuellen Touren zu erreichen. Zu diesem Zweck wird ein zunächst beliebiger oder dynamischer

Transferknoten vereinbart, an dem beispielsweise das Umsteigen von Fahrgästen möglich ist. Bei den stattfindenden Fahrzeugwechseln werden die Fahrgäste, deren Beförderung die größten zusätzlichen Kosten verursacht, solchen Fahrzeugen zugeordnet, die bereits Fahrgäste mit ähnlichen Zielen befördern. Auf diese Weise wird eine Optimierung der Touren realisiert, da die jeweiligen Ziele auf Grund der geografischen Nähe mit geringerem Kostenaufwand zu erreichen sind. Zusätzlich wird die mit dem Fahrzeugwechsel verbundene Wartezeit minimiert, da die Transferknoten von den beteiligten Fahrzeugen theoretisch in der gleichen Zeit erreicht werden.

Abschließend wurden in Abschnitt 4.4 geostatistische Verfahren behandelt, die zur Interpolation von Messwerten mit geografischem Bezug verwendet werden. Im Wesentlichen geht es dabei um die Berechnung lückendeckender Umweltinformationen, die im direkten Zusammenhang mit Verkehrssystemen stehen. Im Vordergrund standen Kriging Verfahren, die entsprechende Berechnungen unter Verwendung tatsächlicher Messwerte auf Basis stochastischer Prozesse ermöglichen.

Basierend auf diesen Grundlagen werden im folgenden Kapitel eigene Anwendungen und Systeme für kooperative Mobilität vorgestellt. Dabei kommen unter anderem mobile Endgeräte zur Erfassung und Verarbeitung von verkehrsrelevanten Kontextinformationen zum Einsatz. Die weitergehende Kooperation zwischen den an der Mobilität beteiligten Entitäten basiert entweder auf der Bereitstellung und der gemeinschaftlichen Nutzung geeigneter Informationen oder auf dem direkten oder indirekten Austausch von Informationen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Die Ziele hängen dabei vom jeweiligen Anwendungsfall ab und reichen von dem Erreichen einer geografischen Position, über eine Reduzierung der Transportkosten bis zur Überwachung der durch die Mobilität verursachten Auswirkungen auf die Umwelt. Der Fokus liegt dabei auf den adressierten Bereichen intelligenter Transportsysteme, die in Abschnitt 2.4.3 identifiziert wurden. Für die einzelnen Bereiche und unter Berücksichtigung der maßgeblichen Akteure werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, wie den bestehenden Herausforderungen (vgl. Abschnitt 2.2) im Verkehrswesen begegnet werden kann.

ANWENDUNGEN UND SYSTEME FÜR KOOPERATIVE MOBILITÄT

Innerhalb der letzten Jahre haben sogenannte ortsbezogene Dienste immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dabei existieren zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten, wie eine kontextabhängige Bereitstellung multimedialer Inhalte [324], die Filterung der in der Nähe befindlichen Sehenswürdigkeiten [36] oder so genannte Buddy- bzw. Child-Tracking Systeme, wobei letztere beispielsweise mit Hilfe der TraX Plattform [309] realisiert werden können. In der Regel kommt, insbesondere wegen der Inhalte und Metadaten, ein Client-Server Modell (vgl. Abschnitt 4.1.2.1) für den Austausch der notwendigen Informationen zum Einsatz. Dabei sind die Prozesse der zentralen Varianten vergleichbar, bei der die Positionsinformationen an einen Server übermittelt werden, der anschließend für die Auswertung, Verarbeitung und Informationsverteilung zuständig ist. In diesem Zusammenhang wird basierend auf der Position des Benutzers und abhängig von dessen Präferenzen nach relevanten bzw. kontextabhängigen Informationen gesucht. Abschließend werden die entsprechenden Informationen zur Darstellung an das Endgerät übermittelt. Die grundlegende Funktionsweise ortsbezogener Dienste und Anwendungen findet auch in der Transportdomäne Anwendung, wie einige der in Kapitel 3 vorgestellten Systeme zeigen. Im Hinblick auf die Mobilität können diese zu einer effizienteren Nutzung vorhandener Infrastruktur und somit zu einer Reduzierung des Verkehrs beitragen.

In diesem Kapitel werden eigene Anwendungen und Systeme mit Bezug zu den adressierten Bereichen intelligenter Transportsysteme vorgestellt. Je nach Bereich beziehen sich die Ansätze auf die identifizierten Akteure, wobei die jeweiligen Anforderungen aus Abschnitt 2.3.2 berücksichtigt werden. Abschnitt 5.1 greift zunächst den Bereich der Reiseinformationen auf und stellt zwei Anwendungen vor, die sich an die Benutzer richten. Dabei handelt es sich einerseits um eine kontextabhängige Anwendung, die den Benutzer im öffentlichen Nahverkehr unterstützt, und andererseits wird eine Möglichkeit zur Förderung von alternativen Mobilitätsangeboten in Form von dynamischen Fahrgemeinschaften vorgestellt. Im Hinblick auf das Verkehrsmanagement wird in Abschnitt 5.2 ein kollaborativer Ansatz zum Parkraummanagement vorgestellt und richtet sich vordergründig an die Administration bzw. deren Interesse an der Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs. Die notwendigen Informationen werden gemeinschaftlich von den Benutzern zur Verfügung gestellt und können von diesen genutzt werden, um eine tatsächliche Verbesserung zu erzielen. Somit kann das System, das sich dem Problem der Parkplatzsuche annimmt, aus der Sicht der

Benutzer auch den Reiseinformationen zugeordnet werden. Das in Abschnitt 4.3.3 vorgestellte Prinzip der dynamischen Transferknoten wird in Abschnitt 5.3 wieder aufgegriffen. In diesem Zusammenhang werden unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten zur Realisierung eines Systems für den bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transport vorgestellt. Im Vordergrund steht hierbei eine flexible und effiziente Beförderung von Personen in städtischen Gebieten. Aus Sicht der Mobilitätsanbieter steht dabei eine Reduzierung der für die Beförderung notwendigen Kosten im Vordergrund, die sich beispielsweise auf die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge oder die von diesen zurückgelegten Distanzen beziehen. Allerdings ist neben der Minimierung der Kosten auch eine akzeptable Dienstqualität, in Form der Gesamtfahrzeiten und der Verfügbarkeit des Angebots, essentiell. Abschließend wird in Abschnitt 5.4 ein System zur gemeinschaftlichen Schadstoffüberwachung in Megastädten präsentiert. Das System kann primär für die Überwachung der aktuellen Umweltsituation eingesetzt werden und richtet sich damit in erster Linie an die Administration. Unter Berücksichtigung des Umweltschutzes und zur Steigerung der Lebensqualität sind darauf aufbauende Anwendungen allerdings auch den Reiseinformationen und damit den Benutzern bzw. Bewohnern urbaner Siedlungsräume zuzuordnen.

5.1 Anwendungen zur Bereitstellung von Reiseinformationen für Benutzer

In diesem Abschnitt werden zwei Anwendungen vorgestellt, um den Benutzer bei der individuellen Mobilität zu unterstützen. Bei der ersten Anwendung bezieht sich die Unterstützung auf die lokale Bereitstellung aktueller und kontextabhängiger Informationen im öffentlichen Nahverkehr, wodurch die Attraktivität und damit die Nutzung des vorhandenen Angebots gefördert werden kann. Die zweite Anwendung bezieht sich auf die Unterstützung zur Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften und fokussiert sich damit auf alternative Mobilitätsangebote, die in der Regel von Privatpersonen zur Verfügung gestellt werden und somit in den gemeinschaftlichen kooperativen Kontext einzuordnen sind. Insbesondere bei spontanen Fahrten kann dieser Ansatz zur Reduzierung des Verkehrsaufkommens und zu einer effizienteren Nutzung der vorhandenen Ressourcen beitragen. In den folgenden Abschnitten wird zum besseren Verständnis jeweils ein Anwendungsfall konkretisiert, bevor auf die Umsetzung der Systeme eingegangen wird. Die jeweiligen Ergebnisse werden im Anschluss diskutiert.

5.1.1 Mobile Anwendung zur Routenplanung im öffentlichen Verkehr

Navigationsgeräte sind in den letzten Jahren zu einem praktischen Hilfsmittel geworden. Basierend auf einer Adresse und der aktuellen Position, die durch einen GPS Empfänger ermittelt wird, berechnen diese Geräte lokal eine ideale Route zum gewünschten Ziel. Neben Präferenzen und Einschränkungen, wie beispielsweise die Nutzung der kürzesten bzw. schnellsten Route oder die Vermeidung von Mautstraßen, erlauben entsprechende Systeme auch die Berücksichtigung aktueller Kontextinformationen, wie Stauwarnungen oder

Straßensperrungen. Weicht der Fahrer von der geplanten Route ab oder ändern sich die Rahmenbedingungen bezüglich anderer Kontextinformationen, so führt dies zu einer Aktualisierung bzw. Neuberechnung der geplanten Route. Dadurch wird der Fahrer während der gesamten Reise bis zum eigentlichen Ziel unterstützt und ist zu jeder Zeit über seine Position, die aktuell beste Route, die zu fahrende Strecke und die erwartete Ankunftszeit informiert.

Das Ziel der im Folgenden vorgestellten Anwendung ist es, den Benutzer während der Fahrt mit den öffentlichen Verkehrsmitteln zu unterstützen und diesen bei möglichen Änderungen oder Abweichungen proaktiv über geeignete Alternativen zu informieren. Damit soll die herkömmliche Fahrzeugnavigation auf den öffentlichen Verkehr übertragen werden, um die Flexibilität und Transparenz zu steigern. Durch den entstehenden Informationsmehrwert kann zusätzlich die Attraktivität des öffentlichen Nahverkehrsnetzes erhöht und somit ein stärkerer Anreiz für dessen Nutzung geschaffen werden, mit dem Ziel, den Individualverkehr und das damit verursachte Verkehrsaufkommen zu reduzieren. Das Problem hierbei ist eine sinnvolle Modellierung des öffentlichen Verkehrsnetzes, bei dem es sich im Gegensatz zum herkömmlichen Straßennetz um ein getaktetes multimodales System handelt. Da die Berechnungen lokal erfolgen, ist zusätzlich eine effiziente Speicherung und Verwaltung des Verkehrsnetzes auf mobilen Geräten mit beschränkten Ressourcen notwendig. Multimodale Systeme setzen sich aus unterschiedlichen Verkehrsmitteln, wie beispielsweise Bus, Tram, U- und S-Bahn sowie den entsprechenden Zugangspunkten in Form von Haltestellen zusammen, die von den Fahrzeugen in regelmäßigen Abständen bedient werden. An entsprechenden Haltestellen können die Fahrgäste zwischen den unterschiedlichen Modi wechseln, um das Ziel zu erreichen, wobei in der Regel Wartezeiten beim Wechsel des Verkehrsmittels berücksichtigt werden müssen. Die Strecken von der aktuellen Position zur nächstgelegenen Haltestelle und von der finalen Haltestelle zum eigentlichen Ziel werden in der Regel zu Fuß zurückgelegt. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Streckenabschnitte des öffentlichen Verkehrsnetzes nicht zu jeder beliebigen Zeit befahren werden, sondern nur zu den Zeiten an denen die jeweilige Haltestelle von einem Fahrzeug bedient wird. Diese Art der lokalen Routenplanung und kontextbasierten Aktualisierung unter Berücksichtigung multimodaler getakteter Verbindungen in Kombination mit ungetakteten Streckenabschnitten, die beispielsweise zu Fuß zurückgelegt werden, fand bisher kaum Beachtung.

Aktuelle mobile Routenplaner sind in der Lage, Positionsdaten, die beispielsweise mit Hilfe eines GPS Empfängers erfasst werden, zu verarbeiten und dem Benutzer abhängig von seinem Standort die nächstgelegenen Haltestellen zusammen mit den entsprechenden Abfahrtszeiten oder teilweise auch eine Routenempfehlung zu präsentieren (vg. Abschnitt 3.1.1). Hierbei kommt allerdings eine klassische Client-Server Architektur zum Einsatz, bei der das Endgerät eine Anfrage an einen zentralen Dienst stellt und die empfangenen Daten lokal auf dem Endgerät aufbereitet. Die auf der Serverseite verwendeten Systeme arbeiten in der Regel mit den statischen Fahrplaninformationen und bieten zeitlich getaktete Optionen, aus denen der Benutzer wählen kann. Derzeit bieten diese Anwendungen jedoch nicht die Möglichkeit basierend auf dem Kontext des Benutzers eine proaktive Aktualisierung der Route lokal auf dem Endgeräte vorzunehmen. Falls es zu Abweichungen im Fahrplan kommt, muss

der Benutzer aktiv eine Aktualisierung initiieren.

5.1.1.1 Szenario

Mit einem einleitenden Beispiel wird zunächst der Nutzen und die Grundfunktionalität einer lokal arbeitenden und proaktiven Anwendung zur Routenplanung im öffentlichen Nahverkehr verdeutlicht, ehe auf die konkrete Umsetzung eingegangen wird.

Eine im Vorfeld geplante Route führt den Benutzer zunächst zu Fuß zu einer Bushaltestelle. Nach einigen Stationen muss dieser in die U-Bahn umsteigen und das letzte Stück zum Ziel wieder zu Fuß zurücklegen. Allerdings wird die Fahrt mit dem Bus durch einen Stau verzögert, so dass der Benutzer seinen Anschluss verpasst. Die Anwendung sucht basierend auf dem aktuellen Kontext nach möglichen Optionen, mit denen das Ziel auf einem anderen Weg erreicht werden kann, ohne dass der Benutzer die Zeit bis zur nächsten U-Bahn warten muss und somit das Ziel gegebenenfalls schneller erreicht. In diesem Fall empfiehlt die mobile Anwendung bereits an der nächsten Station in eine Tram-Bahn umzusteigen und nach einigen Stationen in die U-Bahn zu wechseln. Dies bedeutet zwar eine Einschränkung des Komforts bezüglich des zusätzlichen Fahrzeugwechsels, aber der Benutzer kann sein Ziel schneller erreichen als mit der ursprünglich geplanten Route, bei der die Wartezeit bis zur nächsten Verbindung hinzu kommen würde.

Zur Realisierung einer kontextabhängigen Anwendung zur Routenplanung im öffentlichen Nahverkehr müssen geeignete Informationen lokal verfügbar sein und wegen der begrenzten Ressourcen eines mobilen Endgeräts geeignet verwaltet werden, um eine lokale und proaktive Aktualisierung zu ermöglichen. In den folgenden Abschnitten wird ein entsprechender Ansatz vorgestellt, wobei die Daten zunächst aufbereitet und anschließend lokal auf einem Endgerät genutzt werden können.

5.1.1.2 Systemüberblick

Insgesamt kann das entwickelte System [59, 62], dessen Architektur in Abbildung 5.1 dargestellt ist, in zwei Bereiche unterteilt werden. Einerseits handelt es sich um die Datengewinnung und -aufbereitung, bei der die notwendigen Informationen extrahiert, gefiltert und mit zusätzlichen Metadaten angereichert werden. Dieser Prozess wird von einer zentralen Entität durchgeführt, die im Anschluss die erzeugten Daten zur lokalen Nutzung zur Verfügung stellt. Andererseits ist die mobile Komponente zu nennen, die basierend auf den vorverarbeiteten Informationen und unter Verwendung der lokal verfügbaren Kontextinformationen zur initialen Routenberechnung und für die proaktive Aktualisierung verwendet wird.

Anforderungen

Zur Umsetzung einer entsprechenden Anwendung müssen einige Anforderungen erfüllt werden, um eine multimodale Wegfindung zu ermöglichen, die autonom auf dem Endgerät stattfindet. Zunächst werden geeignete Informationen über das zur Verfügung stehende Straßen- bzw. Wegenetz sowohl für die Abschnitte, die zu Fuß zurückgelegt werden als auch für Teilstrecken im öffentlichen Verkehrsnetz benötigt. Weitere Informationen, wie Distanzen, Straßennamen, Hausnummern oder Angaben zu den Haltestellen und bedienenden

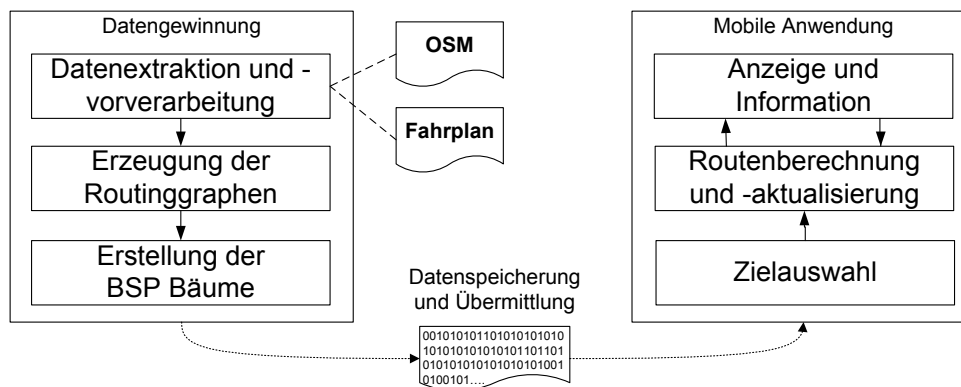


Abbildung 5.1: Systemarchitektur des mobilen Routenplaners

Linien können dem Benutzer als zusätzliche Metadaten angezeigt werden oder unterstützen diesen beispielsweise bei der Zieleingabe. Damit basierend auf der aktuellen Uhrzeit auch die optimalen Routen im öffentlichen Verkehrsnetz gefunden werden können, müssen die Abfahrtszeiten in Form eines Fahrplans zur Verfügung stehen. Um eventuelle Verspätungen bei der Routenplanung zu berücksichtigen, sollten auch Live-Abfahrtszeiten verwendet werden. Da die Anwendung mit den begrenzten Ressourcen auf einem Mobiltelefon auskommen soll, müssen die notwendigen Informationen geeignet modelliert und in einer kompakten Datenstruktur abgelegt werden. Das auf diesen Informationen aufbauende Routingverfahren soll unter Berücksichtigung der Multimodalität eine Verbindung von Tür zu Tür, einschließlich der Fußwege, berechnen.

Datenaufbereitung und Modellierung

Die notwendigen Informationen über das Streckennetz, bestehend aus dem Straßennetz inklusive möglicher Fußwege, dem öffentlichen Verkehrsnetz und geeigneten Anziehungspunkten (englisch: Points of Interest, PoI) beispielsweise in Form von Schulen, Krankenhäusern, Einkaufszentren werden aus dem OpenStreetMap Projekt [39] unter Verwendung entsprechender Werkzeuge, wie OSMOSIS [236], zunächst getrennt voneinander extrahiert. Für den Prototyp wurde dabei der Großraum München verwendet, wobei das öffentliche Verkehrsnetz zusammen mit den entsprechenden Haltestellen anhand von verfügbaren Informationen der Münchener Verkehrsgesellschaft mbH ergänzt wurde. Dabei wurden insbesondere die Namen der Haltestellen vereinheitlicht und neben den planmäßigen Abfahrtszeiten an den Haltestellen auch die Fahrtzeiten zwischen diesen für jede einzelne Linie bestimmt.

Die separat extrahierten Daten liegen in Form von georeferenzierten Punkten (englisch: Nodes) und Streckenabschnitten (englisch: Ways) vor und können als Graph modelliert werden (vgl. Abschnitt 4.3.1). Bezüglich des Straßennetzes (Straßen Graph) bilden alle mehrfach referenzierten Punkte bzw. Nodes der unterschiedlichen Way Elemente der extrahierten Geodaten die Knoten des Graphen. Die Kanten sind die Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten. Dies hat bezüglich der Genauigkeit zwar den Nachteil, dass jeweils die vollständige Strecke zwischen zwei Kreuzungen durchlaufen werden muss, wurde aber im Rahmen der prototypischen Umsetzung in Kauf genommen. Alternativ hätten die entsprechende Segmente mit Hilfe zusätzlicher Punkte in mehrere kleine Teilabschnitte unterteilt werden können, so

dass lediglich die notwendigen Abschnitte, für den Fall, dass sich der Benutzer zwischen zwei Kreuzungen befindet, bei der Routenberechnung verwendet werden. Den Knoten werden als zusätzliche Informationen auch die angrenzenden Straßennamen zugeordnet, die später als Ziel ausgewählt werden können. Für die Gewichtung der jeweiligen Kanten wird die benötigte Zeit zur Bewältigung der entsprechenden Distanz auf Basis einer für Fußgänger typischen Geschwindigkeit verwendet. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch die Verwendung eines GPS Empfängers, mit dem die aktuelle Geschwindigkeit bestimmt und anstelle einer statischen Geschwindigkeit zur Schätzung der Zeit verwendet werden kann. Die Pols werden lediglich als Knoten modelliert und stellen daher keinen Graphen im eigentlichen Sinne dar. Zusätzlich werden allerdings entsprechende Transferkanten eingefügt, die der Einfachheit halber mit der nächstgelegenen Kante des Straßennetzes verbunden werden. Hierbei wird zusätzlich ein neuer Knoten in die betroffene Kante des Straßennetzes eingefügt. Abhängig von der Position des Teilungspunktes werden die Gewichtungen der beiden entstehenden Kanten entsprechend aktualisiert. Diesbezüglich besteht die Möglichkeit einer detaillierteren Modellierung der Strecken von einer Straße zu einem Pol. Dadurch ist gewährleistet, dass das Routingverfahren auch Pols als Ziel akzeptiert und ein mathematisches Verfahren zur Berechnung der Route eingesetzt werden kann. Der Graph für das öffentliche Verkehrsnetz (ÖPNV Graph) wird auf die gleiche Weise erzeugt, wobei die Knoten hierbei die Haltestellen und die Kanten die jeweiligen

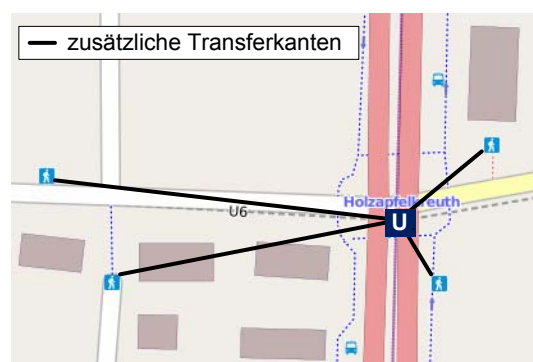


Abbildung 5.2: Beispiel zusätzlicher Transferkanten zwischen öffentlichem Verkehrs- und Straßennetz

Streckenabschnitte der einzelnen Linien repräsentieren. Dabei existiert im Gegensatz zum Straßengraph, der mit Hilfe ungerichteter Kanten modelliert wurde, jeweils eine gerichtete Kante für jede Richtung und jede Linie. Die Gewichtung dieser Kanten basiert auf einer statischen Komponente, zu der eine dynamische Komponente, abhängig von den Abfahrtszeiten und der aktuellen Uhrzeit, beim Aufruf des Algorithmus addiert wird. Auch dieser Graph wird durch Transferkanten von den Haltestellen aus mit dem Straßengraphen verbunden. Bei oberirdischen Haltestellen wird, wie auch schon bei den Pols verfahren, wohingegen bei U- und teilweise S-Bahnen in den OSM Daten die Zugänge zu den Haltestellen verzeichnet sind von denen aus eine entsprechende Kante eingefügt werden kann, wie in Abbildung 5.2 veranschaulicht. Des Weiteren werden so genannte Superkanten eingeführt, die die Route einer Linie und Richtung in Form ihrer Haltestellen repräsentieren und Informationen über die Start- bzw. Zielstation sowie die Fahrplaninformationen enthalten, die zur Berechnung der dynamischen Gewichtungskomponente benötigt werden. Dadurch kann zum einen Speicherplatz gespart werden und bei entsprechender Referenzierung muss zum anderen nicht der gesamte Graph des öffentlichen Verkehrsnetzes im Speicher vorliegen, um beispielsweise die Richtung einer Linie zu bestimmen. Zudem ist eine unkomplizierte Aktualisierung im Falle einer Fahrplanänderung gewährleistet. Insgesamt entstehen dadurch drei unabhängige georeferenzierte Graphen, die

mit Hilfe der Transferkanten miteinander verbunden sind, wie in Abbildung 5.3 skizziert. Auf

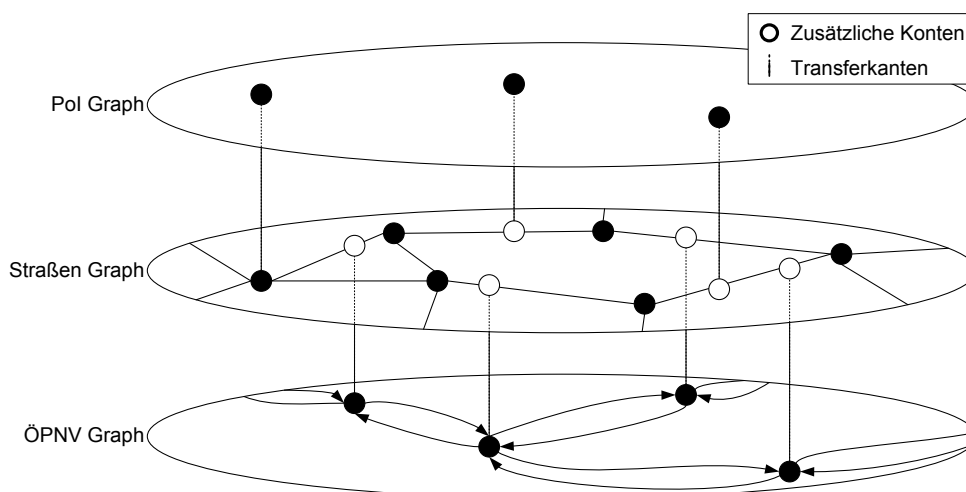


Abbildung 5.3: Zusammengesetzter Pol, Straßen und ÖPNV Graph

diese Weise wurde ein multimodales Streckennetz modelliert, bei dem sowohl das Wegenetz für die Fußwege als auch das öffentliche Verkehrsnetz, bei dem zwischen Richtung, Linie und Abfahrtszeit unterschieden werden kann, berücksichtigt wird. Die zusätzlichen Transferkanten, insbesondere zwischen dem Straßen Graph und dem ÖPNV Graph, erlauben den Wechsel zwischen diesen Wegenetzen und repräsentieren die Verbindungspunkte.

Datenspeicherung

Eine wichtige Technik zur Reduzierung der Menge der Navigationsdaten, die gleichzeitig im limitierten Arbeitsspeicher des Endgeräts bereit liegen müssen, ist die räumliche Unterteilung des betreffenden Gebietes. Für die Routenberechnung ist im Normalfall nicht der vollständige Graph notwendig, sondern es ist ausreichend, wenn lediglich der relevante Ausschnitt untersucht wird, wie in Abbildung 5.4 am Beispiel des Münchner Straßennetzes dargestellt. Mit dieser Alternative zur zielgerichteten Suche, die beispielsweise beim A* Verfahren (vgl. Abschnitt 4.3.1.1) zum Einsatz kommt, wird der Suchraum verkleinert und wirkt sich daher positiv auf die Performanz aus. Zu diesem Zweck wird der Raum in Form des zuvor modellierten Graphen in kleinere Teilräume zerlegt, wofür das BSP Verfahren eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.2.2) wird. In der idealisierten Abbildung wird anstelle des vollständigen Graphen lediglich der Teilbaum unter dem Knoten bzw. der Hyperebene H_3 bestehend aus den Gebieten C, D und E im Speicher des Endgerätes vorgehalten und zur Routenberechnung verwendet. Entsprechend der Vorgehensweise zur Erzeugung wird in diesem Fall darauf geachtet, dass auch die Anzahl der Kanten, die durch eine solche Hyperebene geschnitten werden, minimal ist, um dadurch einen möglichst ausgeglichenen BSP Baum zu erzeugen. Diese Technik hat den Vorteil, dass nur so viele Knoten nachgeladen werden müssen, bis der Start- und Zielpunkt im Speicher vorliegen, wodurch in vielen Fällen ein wesentlich kleinerer Suchraum entsteht, der einerseits im Anschluss effizienter vom gewählten Algorithmus untersucht werden kann und andererseits zur Reduzierung der im Speicher vorgehaltenen Daten beiträgt. Für den ÖPNV Graph muss zusätzlich darauf geachtet

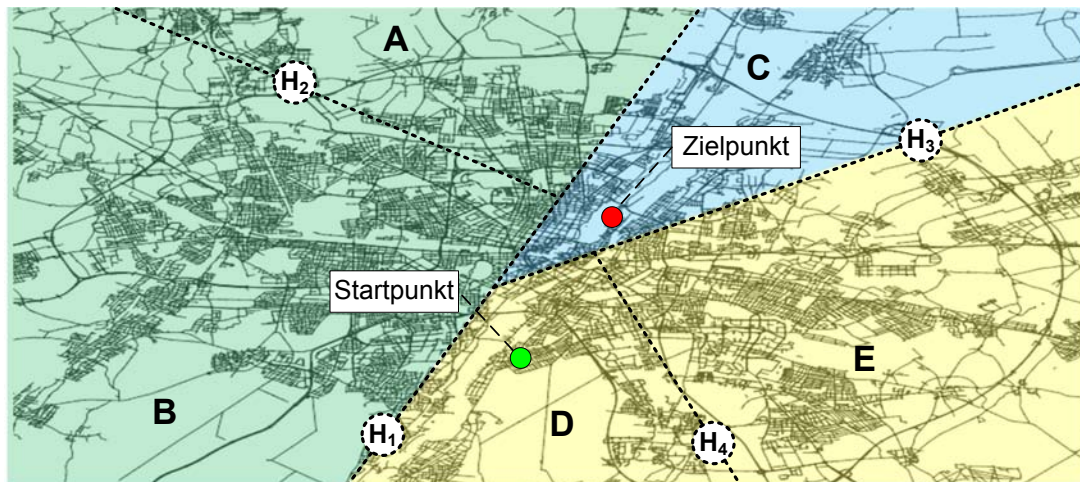


Abbildung 5.4: Hierarchische Unterteilung des Münchner Straßennetzes für die Routenberechnung vom Start- zum Zielpunkt

werden, dass die Teilungsebenen nach Möglichkeit Kreuzungspunkte schneiden, um bei der anschließenden Expansion des Baumes einen navigierbaren ÖPNV Graph zu erhalten. Eine weitere Möglichkeit, um einen navigierbaren ÖPNV Graph zu erhalten oder dessen partielle Vollständigkeit zu überprüfen, basiert auf der Verwendung der Referenzierungen von den Haltestellen im relevanten Bereich zu den betroffenen Superkanten und dem sukzessiven Hinzufügen der betroffenen Streckenabschnitte. Abhängig von der Dichte des Verkehrsnetzes und dem entsprechenden Datenvolumen, kann aber auch von einer Unterteilung des ÖPNV Graphen abgesehen werden. Anschließend werden diese Daten in einem kompakten binären Format gespeichert. Das entwickelte Format unterstützt die Anbindung zusätzlicher Ressourcen, wodurch beispielsweise auch Informationen über die Barrierefreiheit von der Routenplanung berücksichtigt werden können. Die Struktur des BSP Baumes wird mit Hilfe des Offsets realisiert. Zur Bestimmung der Position, an der die jeweiligen Elemente gespeichert werden, wird zunächst das Schreiben in eine Datei simuliert, so dass die entsprechenden Referenzierungen beim tatsächlichen Schreibvorgang eingetragen werden können.

Mobile Anwendung

Die wesentlichen Aufgaben der mobilen Anwendungen beziehen sich zum einen auf die Interaktion mit dem Benutzer und zum anderen auf die Suche nach einer idealen Route sowie gegebenenfalls deren Aktualisierung. Die aktuelle Position des Benutzers wird mittels GPS ermittelt und auf einem entsprechenden Kartenausschnitt angezeigt. Zusätzlich dient die aktuelle Position als Startpunkt der zu ermittelnden Route. Dabei besteht ebenfalls die Möglichkeit der manuellen Eingabe der notwendigen Informationen. Sobald die Position festgestellt wurde, wird der unterste Knoten im BSP-Baum geladen, der diese enthält. Die Interaktion mit dem Benutzer beschränkt sich vorrangig auf die Eingabe des Ziels, bei der entweder ein Straßename eingegeben oder das Ziel aus den Pols oder Haltestellen ausgewählt werden kann. Denkbar ist auch die Berücksichtigung geeigneter Präferenzen, wie beispielsweise die Einschränkung auf bestimmte Verkehrsmittel oder der maximal akzeptable

Fußweg. Entsprechende Angaben können mit Hilfe der vorhandenen Metadaten bei der Routenberechnung berücksichtigt werden. Sobald das Ziel eingegeben wurde, wird der BSP Baum so lange expandiert, bis das eingegebene Ziel gefunden wurde und somit im navigierbaren, also dem für die Route relevanten, Bereich liegt. Nachdem insbesondere beim öffentlichen Verkehrsnetz die Kantengewichte in Form von Zeiten vorliegen, wird im Folgenden die schnellste Route mit Hilfe des Dijkstra Algorithmus berechnet. Das Routingverfahren muss dabei entsprechend angepasst werden, um die dynamischen Komponenten der Kantengewichte zur Laufzeit des Algorithmus zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird bei jedem Knoten neben den aktuellen Kosten auch die erwartete Ankunftszeit, basierend auf der aktuellen Uhrzeit unter Berücksichtigung der bereits zurückgelegten Strecke, bestimmt und vermerkt. Anhand der statischen Fahrplaninformationen, die in der Superkante der jeweiligen Linie vorliegen, kann aus der Differenz die Wartezeit, die der dynamischen Gewichtungskomponente entspricht, bestimmt werden. Abbildung 5.5 veranschaulicht diesen

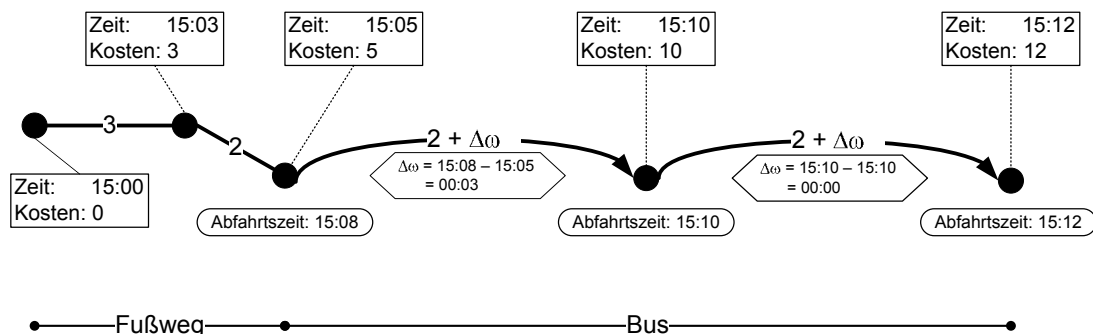


Abbildung 5.5: Berechnung der dynamischen Komponente bei der Routenplanung

Vorgang. Angenommen der Benutzer erreicht nach der Routenplanung die Haltestelle um 15:05 Uhr. Laut Fahrplan fährt die U-Bahn um 15:08 Uhr und benötigt 2 Minuten bis zur nächsten Haltestelle. Das Kantengewicht beträgt somit insgesamt 5 Minuten und setzt sich aus der statischen Komponente von 2 Minuten sowie der dynamischen Komponente zusammen. Die dynamische Komponente von 3 Minuten ergibt sich aus der Differenz der planmäßigen Abfahrtszeit um 15:08 und der Ankunftszeit des Benutzers um 15:05 zusammen. Die Fahrzeit zur nächsten Haltestelle beträgt wiederum 2 Minuten und die dortige Abfahrtszeit ist 15:10, wodurch sich in diesem Fall ein dynamischer Anteil 0 Minuten ergibt. Die dynamische Komponente könnte durch die Nutzung so genannter Live Abfahrtszeiten noch präzisiert werden, wobei diese vor dem Erreichen der entsprechenden Haltestelle von einem geeigneten Dienst, wie beispielsweise MVG live [225], abgerufen werden können. Generell ist eine Ermittlung der Live Daten nur sinnvoll, wenn die Haltestelle von unterschiedlichen Linien oder Verkehrsmitteln bedient wird. Die Zeitintervalle der einzelnen Streckenabschnitte werden zusammen mit den Geodaten in einer separaten Liste geführt, so dass von der Anwendung festgestellt werden kann, ob sich der Benutzer basierend auf der aktuellen Position und Uhrzeit noch innerhalb eines Toleranzbereiches für den geplanten Streckenabschnitt befindet. Ist dieser Bereich in Form eines Zeitintervalls überschritten wird die Berechnung der Route proaktiv wiederholt, um festzustellen, ob sich Änderungen gegenüber der zuvor geplanten

Route ergeben. Ist dies der Fall, wird der Benutzer über die aktualisierte Route informiert. Nachdem die Positionsbestimmung auf dem Empfang des GPS Signals basiert, die aber insbesondere bei Fahrten mit der U-Bahn nicht verfügbar sind, muss die aktuelle Position auf eine andere Weise ermittelt werden. In diesen Bereichen besteht die Möglichkeit die zurückgelegte Distanz mit Hilfe einer zeitlichen Interpolation zu schätzen. Als Indikator für das Erreichen der jeweiligen Stationen können hierfür die Beschleunigungssensoren verwendet werden, mit deren Hilfe in [143, 275, 298, 319, 332] das Fortbewegungsmittel anhand typischer Muster mit hoher Wahrscheinlichkeit bestimmt werden kann. Abbildung 5.6 zeigt eine Beispielmessung anhand der auch die Identifizierung einzelner Haltestellen möglich ist, wodurch die aktuelle Position des Benutzers mit Hilfe einer einfachen Interpolation geschätzt werden kann. Anschließend kann über einen Abgleich der verstrichenen Zeit und der Position bestimmt werden, ob eine Aktualisierung der Route vorgenommen werden soll.

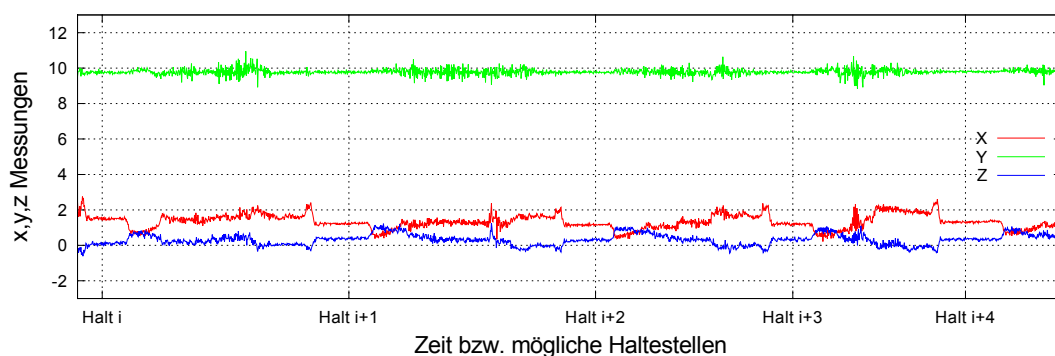


Abbildung 5.6: Beispielmessung zur Haltestellenerkennung (U-Bahn)

5.1.1.3 Diskussion

Zunächst lässt sich bezüglich der Vollständigkeit der OSM Daten im ausgewählten Bereich festhalten, dass derzeit etwa 850 von 1090 bekannten Haltestellen (ca. 78%, Stand: Dezember 2010) erfasst sind und die daraus entstandenen Inkonsistenzen automatisiert behoben werden konnten. Die prototypische Anwendung wurde im begrenzten Umfang für den Großraum München implementiert und getestet. Allerdings wurde die Funktionalität zur proaktiven Aktualisierung lediglich auf Basis der GPS Koordinaten und der Zeit durchgeführt, da im Rahmen der Implementierung auf eine Distanz- bzw. Zeitinterpolation, die beispielsweise bei U-Bahnfahrten notwendig ist, verzichtet wurde. Zu Testzwecken wurde die im Konzept angesprochene Ergänzung des ÖPNV Graphen auf Basis der Superkantenreferenzierung nicht umgesetzt, sondern stattdessen die gleichen Teilungsebenen wie beim Straßengraph verwendet, was teilweise zu unvollständigen ÖPNV Routen führte, die daraufhin nicht als schnellster Weg identifiziert wurden. Zudem fiel auf, dass im ungünstigsten Fall der gesamte Graph in den Speicher geladen werden muss, wenn der Start- und Endpunkt jeweils auf einer Seite des Wurzelknotens im BSP-Baum liegen. Die dafür notwendigen Expansionsschritte benötigten überproportional viel Zeit, wobei das angepasste Routingverfahren im Vergleich dazu nur einen Bruchteil zur gesamten Ausführungszeit beiträgt. Insbesondere im Zusammenhang mit der verwendeten Speicherstruktur und der

hierarchischen Unterteilung des Raumes sind daher noch entsprechende Analysen und der Vergleich mit anderen Verfahren zur Raumunterteilung, wie dem Quadtree Verfahren aus Abschnitt 4.2.2, anstelle des BSP Baumes notwendig. Im Zusammenhang mit der Verwaltung und Organisation des ÖPNV Graphen, ist eine hierarchische Unterteilung aus den angesprochenen Gründen nur bedingt geeignet. Eine dahingehende Optimierung kann durch ein Nachladen der Knoten anhand der in den Superkanten referenzierten Haltestellen erreicht werden. Bezüglich des Routingverfahrens bieten hybride Ansätze, die zunächst den Routinggraphen in der Breite durchsuchen bis gewisse Kosten erreicht sind (z.B. 5 Minuten Fußweg) oder eine entsprechende Anzahl von Haltestellen gefunden wurde und anschließend eine zielgerichtete Suche von den gefundenen Haltestellen zum Ziel durchführen, eine effiziente Alternative. Eine ebenfalls in den Grundlagen erwähnte Möglichkeit stellen auch bidirektionale Verfahren dar, die parallel vom Start- und vom Zielpunkt nach potenziellen Haltestellen suchen und im Anschluss lediglich den ÖPNV Graphen zur Routenberechnung zwischen den gefundenen Haltestellen zu nutzen. Allerdings ist im multimodalen Fall zu beachten, dass bei der bidirektionalen Suche vom Zielort aus lediglich die schnellsten Wege bis zu den nächstgelegenen Haltestellen sinnvoll sind, da der ÖPNV Graph mit gerichteten Kanten modelliert ist und sich der Hinweg vom Rückweg unter anderem in den Abfahrtszeiten unterscheiden kann.

Insgesamt bietet der vorgestellte Ansatz und die entwickelte Lösung eine sinnvolle Erweiterung zu bestehenden Systemen, da eine tatsächliche Navigation von Tür zu Tür inklusive der notwendigen Fußwege ermöglicht wird und der Benutzer während der Fahrt und im Fall einer Abweichung von der geplanten Route über mögliche Alternativen informiert ist und entsprechend reagieren kann. Zudem erfolgt die grundlegende Routenplanung lokal und ohne die Anbindung an ein zentrales System, da die notwendigen Daten in kompakter Form auf dem Endgerät vorliegen. Das hierfür entwickelte Datenformat unterstützt dabei auch die Anbindung zusätzlicher Metadaten, mit denen neben dem aktuellen Kontext auch entsprechende Präferenzen berücksichtigt werden können. Durch die Reduzierung des benötigten Speicherbedarfs mit Hilfe des BSP Verfahrens ermöglicht die vorgestellte Anwendung die Verwaltung und Verarbeitung größerer Datenmengen, wobei durch das Datenformat ebenfalls der Platzbedarf verringert werden könnte. Die lokale Ausführung der multimodalen Routenplanung ist dabei der entscheidende Unterschied zu vergleichbaren Arbeiten, die eine permanente Internetanbindung voraussetzen. Somit stellt diese Anwendungen auch in nicht vertrauten öffentlichen Verkehrsnetzen einen erheblichen Informationsmehrwert dar und kann dabei die Attraktivität und Nutzung des entsprechenden Mobilitätsangebotes fördern, wodurch der Individualverkehr reduziert werden kann.

5.1.2 Dynamische Bildung von Fahrgemeinschaften

In diesem Abschnitt wird ein dezentrales, lokal arbeitendes System [63] vorgestellt, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde und sich hauptsächlich an spontane Fahrgemeinschaften bzw. das Teilen von Gruppentickets im schienengebundenen Verkehr richtet. Im Zusammenhang mit Fahrgemeinschaften kann dabei insgesamt eine Reduzierung der Kosten durch eine stärkere Auslastung erzielt werden. Im Gegensatz dazu werden beim

schienengebundenen Verkehr zwar die Reisekosten unter den Beteiligten aufgeteilt, aber dadurch entfallen auch entsprechende Einnahmemöglichkeiten für den Transportanbieter. Dennoch kann ein solches System zu einer Steigerung der Attraktivität und der Nutzung beitragen und somit weitere Kunden anziehen. Im Fall von Gruppentickets ist es vor allem bei spontanen Fahrten schwierig in kurzer Zeit passende Begleiter zu finden oder freie Plätze anzubieten. Hinzu kommt, dass das tatsächliche Auffinden von Personen, besonders wenn kein konkreter Treffpunkt im Vorfeld vereinbart wurde, ein zeitaufwendiger Prozess ist. Mit Hilfe mobiler Endgeräte soll dieser Prozess vereinfacht werden, wobei neben dem Abgleich der gewünschten Route gegebenenfalls auch die aktuelle Position der entsprechenden Personen genutzt wird, um das Zusammenfinden ohne einen im Vorfeld vereinbarten Treffpunkt zu gewährleisten. Unter Berücksichtigung der kurzen verfügbaren Zeitspanne, bietet sich hierfür ein lokaler Ansatz an, über den die Geräte im Ad hoc Modus die notwendigen Daten austauschen und damit eine Kooperation zwischen den Teilnehmern ermöglichen. Ohne die Verwendung einer zentralen Entität ist zusätzlich gewährleistet, dass die Daten und Informationen nur eine begrenzte Dauer und innerhalb eines entsprechenden Gebietes gültig bzw. verfügbar sind. Unter Berücksichtigung des Datenschutzes und der Privatsphäre bietet diese Vorgehensweise einen großen Vorteil gegenüber zentralen Ansätzen.

5.1.2.1 Szenario

Das folgende Szenario skizziert einen möglichen Anwendungsfall und beschreibt die Funktionsweise der entwickelten Anwendung. Eine Gruppe von drei Personen nutzt ein Gruppenticket für fünf Personen und hat somit noch zwei freie Plätze. Am Bahnhof entscheidet sich die Gruppe die zur Verfügung stehenden Plätze vor der Abfahrt anzubieten. Zu diesem Zweck nutzen die Mitglieder der Gruppe eines der Smartphones und bieten die freien Plätze über ein lokales Ad hoc Netzwerk in der unmittelbaren Umgebung an. Eine andere Person erreicht den Bahnhof, und bevor diese sich eine eigene Fahrkarte kauft, startet sie die TicketShare Anwendung und gibt dort das gewünschte Ziel ein. Die Anwendung versucht daraufhin, sich entweder mit einem bestehendem Ad hoc Netz zu verbinden oder ein neues einzurichten. Sofern sich die beiden Endgeräte in Kommunikationsreichweite befinden, beispielsweise auch durch den Einsatz einer Multi-Hop Strategie, sucht die Anwendung nach Angeboten, die sich mit dem eingegebenen Ziel kombinieren lassen. Sobald ein passendes Angebot gefunden wurde, werden zusätzlich die aktuellen Positionen vom suchenden und anbietenden Benutzer ausgewertet und übermittelt, so dass dadurch ein schnelles und einfaches Ausfindigmachen der beteiligten Personen ermöglicht wird. Die vereinfachte Darstellung in Abbildung 5.7 zeigt den allgemeinen Ablauf zur Unterstützung dynamischer Fahrgemeinschaften. Zunächst wird ein Angebot zusammen mit zusätzlichen Informationen innerhalb der Kommunikationsreichweite des Endgerätes über einen Broadcast verschickt (Abbildung 5.7a). Gleichzeitig werden Gesuche auf die gleiche Art und Weise übermittelt und jedes Endgerät prüft, ob sich die jeweiligen Fahrten kombinieren lassen (Abbildung 5.7b). Besteht die Möglichkeit zur Kombination, also beispielsweise zum Teilen eines Tickets, werden zusätzlich die Positionsdaten ausgetauscht, wodurch das Zusammenfinden der beteiligten Personen erleichtert wird (Abbildung 5.7c).

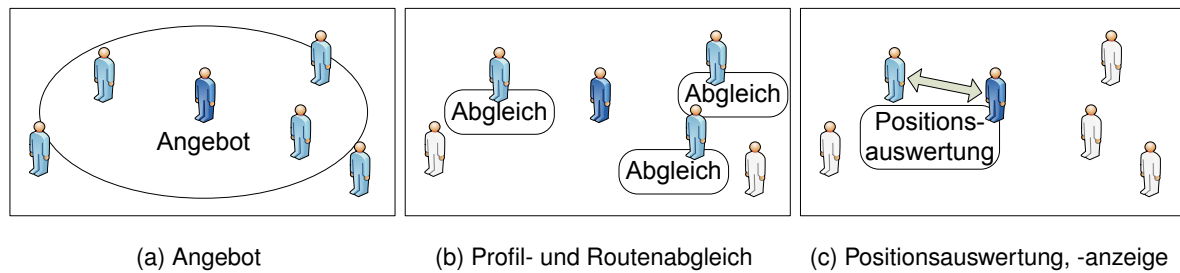


Abbildung 5.7: Ablauf zur Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften

5.1.2.2 Systemüberblick

Zugunsten des räumlich begrenzten Einsatzgebietes und des spontanen Charakters steht die Ad hoc Kommunikation über WLAN (vgl. Abschnitt 4.1.1.2) im Vordergrund, wodurch auf eine zentrale Komponente vollständig verzichtet wird. Der Datenaustausch erfolgt demnach nicht wie bei heimischen WLAN Netzwerken über einen Router im infrastrukturbasierten Modus, sondern basiert auf der spontanen Vernetzung einzelner Geräte. Im Gegensatz zu existierenden Systemen, die auf dem Client-Server Modell basieren, wird im Folgenden eine Architektur für mobile Endgeräte vorgestellt, die in Abbildung 5.8 dargestellt ist und einen dezentralen Dienst zur Unterstützung dynamischer Fahrgemeinschaften realisiert. Dabei ist die Benutzerschnittstelle für die Interaktion mit dem Benutzer zuständig und

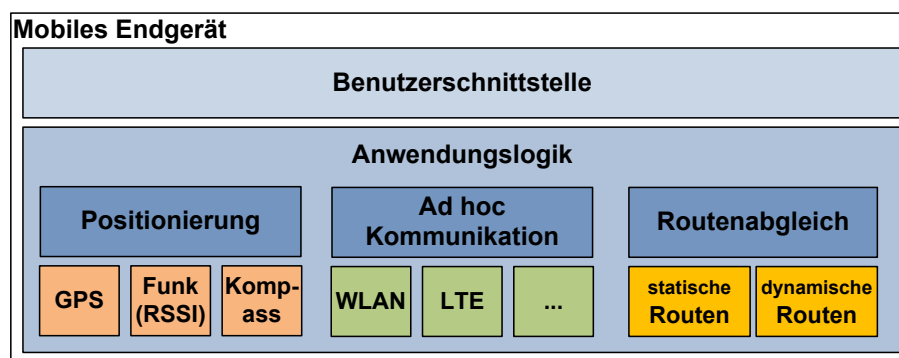


Abbildung 5.8: Systemarchitektur zur Unterstützung spontaner Fahrgemeinschaften

verwaltet die Ein- bzw. Ausgaben, wie beispielsweise die Zieleingabe, die Suche nach Angeboten und Gesuchen sowie die Anzeige der eigenen Position und die der potenziellen Mitfahrer, wobei diese gegebenenfalls auf einer Umgebungskarte angezeigt werden. Zusätzlich erfolgt die Profilkonfiguration bezüglich der eigenen Präferenzen und den gewünschten Charakteristika potenzieller Mitfahrer über diese Schnittstelle. Die Anwendungslogik erfüllt organisatorische Aufgaben bezüglich des Informationsflusses zwischen den einzelnen Komponenten und Ebenen und ist für die notwendige Datenverwaltung zuständig. Die Anwendung ist dabei an das Peer-to-Peer Modell (vgl. Abschnitt 4.1.2.2) angelehnt, wobei basierend auf unterschiedlichen Technologien die notwendigen Informationen lokal zwischen Geräten ausgetauscht, verarbeitet und gegebenenfalls weitergeleitet werden. Die wesentlichen Bestandteile der Anwendungslogik setzen sich aus den Komponenten zur Positionierung, zur

Ad hoc Kommunikation und zum Routenabgleich zusammen. Diese nutzen unterschiedliche Module für die absolute oder relative Positionsbestimmung, für den lokalen Datenaustausch sowie, abhängig vom Anwendungsfall, verschiedene Verfahren zum Routenabgleich. Im Anschluss an die grundlegenden Anforderungen wird für den skizzierten Anwendungsfall je eine Komponente für die Positionsverarbeitung, den Informationsaustausch und den Routenabgleich erläutert.

Anforderungen

Zum Schutz der persönlichen Daten, insbesondere von Ortsinformationen, sollen die Benutzer die Kontrolle über die Informationen haben, die von der Anwendung benötigt und übermittelt werden. In diesem Zusammenhang soll die lokale Verbreitung der Informationen, die lediglich für eine kurze Zeit gültig sind, dabei helfen, bestehende Bedenken auszuräumen. Aus diesem Grund wird ein lokaler Ansatz gegenüber einer zentralen Architektur bevorzugt. Zusätzlicher Schutz bei der Übertragung der Informationen könnte durch eine geeignete dezentrale Authentifizierung und anschließende Verschlüsselung erreicht werden, wofür in [68] ein eigener Vorschlag gemacht wurde. Um dem lokalen Ansatz gerecht zu werden und eine Ad hoc Kommunikation zu ermöglichen, müssen die Endgeräte eine entsprechende Funktionalität bereitstellen. Moderne Smartphones verfügen bereits über ein integriertes WLAN Modul, das zum Aufbau eines Ad hoc Netzwerk genutzt werden kann. Mit der steigenden Abdeckung von LTE Netzwerken und der entsprechenden Hardware kann auch mit dieser Technologie die gewünschte Funktionalität erreicht werden. Im Zusammenhang mit der Positionierung muss der aktuelle Aufenthaltsort des Benutzers absolut oder zumindest relativ bestimmt werden. Hierzu eignet sich im Außenbereich ein GPS Empfänger, mit dem die absolute Position ermittelt werden kann. Im Gegensatz dazu muss auf die absolute Position im Innenbereich verzichtet werden, wobei mit Hilfe entsprechender Verfahren die relative Position zu anderen Teilnehmern bestimmt werden kann. Damit unter Berücksichtigung des dezentralen Ansatzes festgestellt werden kann, ob Angebote über oder Anfragen für freie Plätze zur Verfügung stehen, muss ein geeignetes Verfahren zum Routenabgleich und zur Platzverwaltung bereitgestellt werden. Sowohl für den Einsatz in öffentlichen Verkehrsnetzen als auch im Individualverkehr müssen Informationen über die jeweiligen Transportnetze auf dem Endgerät verfügbar sein. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Komponenten der Anwendungslogik und deren Funktionsweise unter Berücksichtigung der genannten Aspekte beschrieben.

Positionierungskomponente

Die Positionierungskomponente ist für die Bestimmung der absoluten oder relativen Position zuständig. Die absolute Position kann mit Hilfe eines GPS Empfängers bestimmt werden (Abbildung 5.9a), wohingegen die relative Position anhand des Indikators für die empfangene Signalstärke (englisch: Received Signal Strength Indicator, RSSI) bzw. des Signal zu Rauschen Verhältnisses bestimmt werden kann (Abbildung 5.9c), wie in [9] beschrieben. Dabei wird ein Signalausbreitungsmodell zu Grunde gelegt (Abbildung 5.9b), mit dem die relativen Distanzen der einzelnen Teilnehmer abgeleitet werden. Hierbei kann allerdings keine Karte der Umgebung hinterlegt werden, da kein Bezugssystem existiert, mit dem die relativen Positionen auf die absoluten Positionen abgebildet werden können. Dennoch unterstützen

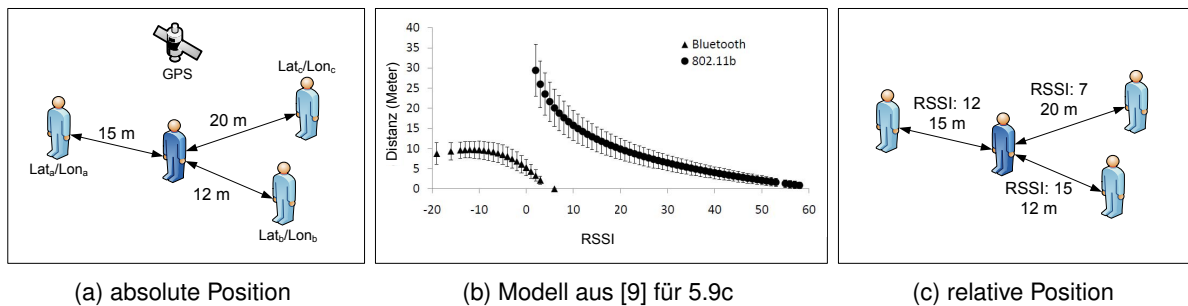


Abbildung 5.9: Varianten der Positionsbestimmung

auch die relativen Positionen der Benutzer das Auffinden der jeweiligen Mitfahrer. Denkbar ist auch die Hinzunahme anderer Sensoren, wie beispielsweise des Kompasses, um zusätzlich Aussagen über die Richtung zu erhalten, in der sich die betreffenden Personen befinden. Dies kann insbesondere bei der relativen Positionsbestimmung zu einer Verbesserung beitragen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit Hilfe der integrierten Komponenten und deren Kombination eine dezentrale Positionierung möglich ist, mit der auch die Distanz zwischen den einzelnen Teilnehmern bestimmt werden kann. Anhand der Positionsinformationen wird das eigentliche Auffinden der jeweiligen Personen zusätzlich erleichtert. Sofern die absoluten Positionen ermittelt wurden, können diese über die Benutzerschnittstelle auf einer geeigneten Karte angezeigt werden. Bei der relativen Positionierung lassen sich zwar auch die Abstände zueinander darstellen, können aber nicht mit einer Umgebungskarte hinterlegt werden.

Kommunikationskomponente

Die Kommunikationskomponente ist für den Aufbau eines Ad hoc Netzwerkes zuständig. Hierfür wird zunächst das Netzwerkgerät konfiguriert, um sich entweder mit einem vorhandenen Ad hoc Netzwerk zu verbinden oder ein neues Netzwerk zu erstellen. Zur Konfiguration der eindeutigen Netzwerkadresse wird das APIPA Protokoll [134] verwendet, bei dem zunächst eine zufällige IP Adresse aus dem 169.254.0.0/16 Adressraum erzeugt wird. Anschließend wird eine ARP Anfrage an alle umliegenden Geräte gesendet. Erhält das Gerät eine Antwort, ist die erzeugte Adresse bereits belegt und eine neue zufällige Adresse wird generiert. Erhält das Gerät nach einem festgelegten Timeout keine Antwort, ist die Adresse nicht belegt und kann dem Netzwerkgerät fest zugewiesen werden. Dieser Prozess ist in Abbildung 5.10 dargestellt, wobei zusätzlich noch die Weiterleitung der Datenpakete mit Hilfe einer Multi-Hop Strategie skizziert ist. In diesem Fall kann die Reichweite des Informationsaustausches vergrößert werden, sofern die Teilnehmer jeweils über einen Hop erreichbar sind. Die Pakete, die die anwendungsspezifischen Informationen enthalten, sind anhand des entwickelten Protokolls aufgebaut. Durch die Verwendung der XML Beschreibungssprache ist das Protokoll für Menschen lesbar und leicht erweiterbar, so dass zusätzliche Funktionalitäten in zukünftigen Versionen einfach hinzugefügt werden können. Eine beispielhafte Ausprägung eines solchen Pakets ist in Listing 5.1 aufgeführt. Ein Paket enthält zur Identifikation, neben der Gerätenummer (Zeile 3, *id*) in Form der MAC Adresse und einer Nummer zur Bestimmung der aktuellen Session (Zeile 4, *session*) bestehend aus der Uhrzeit zu der die Anwendung gestartet wurde, zusätzlich eine einfache

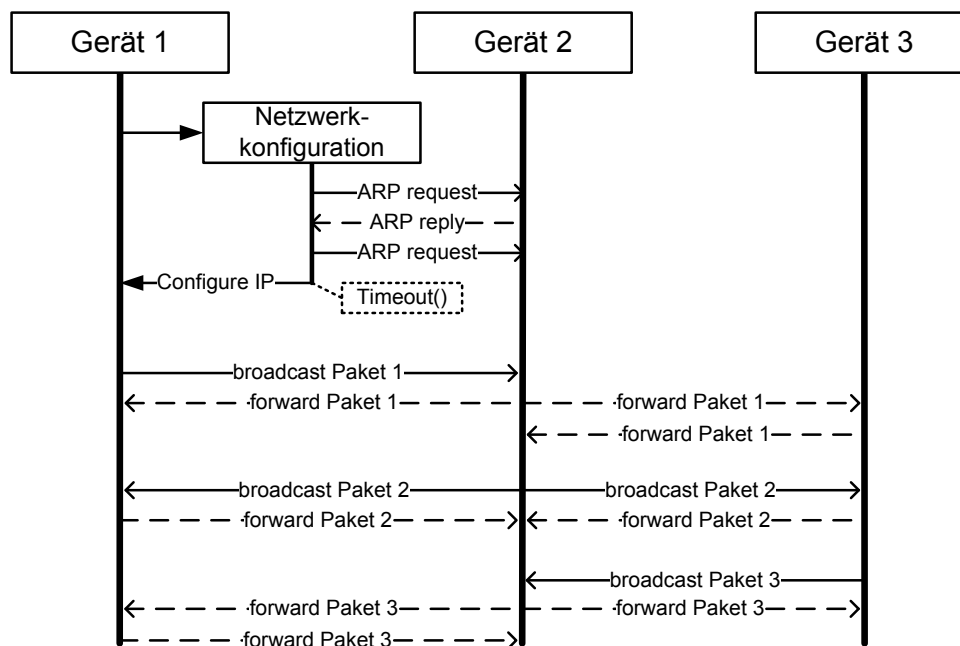


Abbildung 5.10: Adresskonfiguration und Paketweiterleitung

Zählvariable bzw. einen Counter (Zeile 3, `counter`). Letzterer wird für jedes gesendete Paket um 1 erhöht und startet bei jeder Ausführung der Anwendung mit dem Wert 0 für das erste Paket. Anhand dieser Merkmale können alle zuvor empfangenen Pakete des jeweiligen Senders mit der entsprechenden Session ID und einem kleinerem Counter als ungültig markiert und die darin enthaltenen Informationen verworfen werden. Dadurch wird festgestellt, ob das Paket bereits empfangen wurde bzw. ob der Sender bereits bekannt ist oder ob es sich um einen bisher unbekannten Teilnehmer handelt. Daher muss jedes Gerät nur eine Liste von Geräte IDs mit der aktuellsten Session ID und dem höchsten Counter verwalten. Somit ist auch die Aktualität der Daten gewährleistet. Die Session ID und der Counter sind Parameter des `name` Tags (Zeilen 4-6) in dem der Name des Benutzers eingetragen wird, um diesen gegebenenfalls auf anderen Geräten anzuzeigen. Das Protokoll unterstützt auch weitere Profilinformationen (Zeile 7, `settings`), die beispielsweise das Geschlecht, das Alter oder Gewohnheiten beinhalten. Im Gegensatz dazu enthalten die Präferenzen (Zeile 8, `preferences`) die entsprechenden Pedanten, beispielsweise in Form eines Intervalls für das Alter, und spiegeln die gewünschten Vorlieben des Benutzers bezüglich potenzieller Mitfahrer wieder. Weitere Angaben können sich beispielsweise auf einen akzeptablen Umweg oder Preis beziehen. Durch die Berücksichtigung dieser Informationen kann die Suche basierend auf den persönlichen Interessen verfeinert und zusätzlich eingegrenzt werden. Innerhalb des Bestätigungsteils (Zeilen 10-12, `confirmed`) werden die Geräte IDs gespeichert, bei denen eine entsprechende Übereinstimmung gefunden wurde und vom Anbieter bestätigt wurden. Dieser Eintrag kann dabei lediglich vom Anbieter verändert werden, um Doppelreservierungen zu vermeiden. Dies bedeutet zwar einen zusätzlichen Aufwand durch die Eingabe bzw. Bestätigung des Benutzers, dadurch kann aber ein verteilter und zuverlässiger Verhandlungsprozess gewährleistet werden, ohne dass es zu Überbuchungen kommt. Neben der Bestätigung kann auch eine Ablehnung erfolgen


```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
   <packet>
3    <profile id="00:12:34:56:78:9A">
       <name session="1300738151790" counter="27">
5         Anbieter
       </name>
7       <settings>[...]</settings>
       <preferences>[...]</preferences>
9     </profile>
     <confirmed>
11      00:1F:3B:27:56:AB,00:AB:13:71:34:A3
     </confirmed>
13    <rejected>
       00:C0:A8:F1:F1:AC
15    </rejected>
     <origin>
17      <station>Odeonsplatz</station>
       <position>
19        <gps lat="48.150122" lon="11.581163"/>
        <heading>73</heading>
21      </position>
     </origin>
23    <destination line="U6">
       <station>Garching-Forschungszentrum</station>
25       <adress/>
     </destination>
27    <seats>
       <status>available</status>
29       <count>3</count>
     </seats>
31    [...]
   </packet>

```

Listing 5.1: Beispiel eines XML Pakets

(Zeilen 13-15, `rejected`), wobei diese entweder aktiv durch den Anbieter erfolgt oder automatisch, basierend auf dem Ergebnis des Routenabgleichs, von der Anwendung eingetragen wird. Nach der Paketidentifizierung folgt der eigentliche Inhalt des Pakets. Dieser besteht aus dem Startpunkt (Zeilen 16-22, `origin`), der im Fall der TicketShare Anwendung einer Haltestelle entspricht. Neben der Haltestelle wird zusätzlich entweder die aktuelle Position in Form von GPS Koordinaten angegeben oder eine Liste aller Geräte IDs in Empfangsreichweite und dem Indikator für die empfangene Signalstärke (`<wlan rssi1="00:1F:3B:27:56:AB,-29dBm" rssi2="...">`) zur Bestimmung der relativen Position eingetragen. Mit Hilfe der Kompassdaten kann die aktuelle Richtung aufgenommen werden (Zeile 20, `heading`), die dem Benutzer als zusätzliche Orientierung dient. Das Ziel des Benutzers besteht im skizzierten Szenario ebenfalls aus einer Haltestelle (Zeilen 23-26, `destination`). Vergleichbar mit der Startposition können alternativ auch eine Adresse oder die entsprechenden Geokoordinaten vermerkt sein. Im Fall einer Adresse ist allerdings ein geeigneter Dienst für die Umsetzung in entsprechende Geokoordinaten notwendig und setzt eine Internetanbindung voraus. Als weitere Möglichkeit zur lokalen Routenberechnung kann die in Abschnitt 5.1.1 vorgestellte Anwendung als Grundlage verwendet werden. Die Angaben über die jeweiligen Zielhaltestellen werden verwendet, um Überlappungen der Routen festzustellen oder im Fall von Mitfahrgelegenheiten den möglichen Umweg unter Berücksichtigung der zusätzlichen Zielposition zu berechnen. Optional kann vom Benutzer im Fall des TicketShare Anwendungsfalls sowohl die Abfahrtszeit als auch die Linie angegeben werden, damit beispielsweise unterschiedliche Züge, die die gleiche Station

bedienen, differenziert werden können. Ein wesentlicher Bestandteil ist das eigentliche Angebot oder Gesuch in Form von der Anzahl der zur Verfügung stehenden oder gesuchten Plätze (Zeilen 27-30, *seats*). Der *status* Tag (Zeile 28) spezifiziert dabei, ob es sich um ein Angebot bzw. die Verfügbarkeit von Sitzplätzen (*available*) oder um ein Gesuch handelt (*required*).

Komponente zum Routenabgleich

Damit die Anwendung in einem lokalen Netz genutzt werden kann, muss insbesondere im Fall des Routenabgleichs bei der TicketShare Anwendung sichergestellt sein, dass alle Teilnehmer auf den gleichen Basisdaten des jeweiligen Verkehrsnetzes operieren. Dies gilt aber auch für das Straßennetz, wobei in diesem Fall einige Inkonsistenzen hingenommen werden können, da dieses System im Bezug auf die Wegewahl wesentlich *exibler* ist als ein öffentliches Verkehrsnetz. Eine Möglichkeit zur Verwaltung und Nutzung von Informationen über die Straßen- und öffentlichen Verkehrsnetze direkt auf dem mobilen Endgerät wurde bereits in Kapitel 5.1.1 demonstriert. Der Algorithmus zum eigentlichen Routenabgleich arbeitet dabei in 4 wesentlichen Schritten:

1. Überprüfung der Rolle (Anbieter/Suchender)
2. Überprüfung der freien Plätze
3. Überprüfung der Profilinformationen
4. Überprüfung der Routendaten

Handelt es sich bei den Rollen jeweils um einen Anbieter, kann die jeweilige MAC Adresse umgehend in die Liste mit den Ablehnungen aufgenommen werden, so dass die entsprechenden Pakete bei der nächsten Analyse nicht weiter betrachtet werden müssen. Handelt es sich jeweils um ein Gesuch, bestünde im Fall der TicketShare Anwendung die Möglichkeit diese Nutzer ebenfalls zusammenzubringen, so dass sich beispielsweise beide einigen gemeinsam ein Ticket für die entsprechende Personenanzahl zu kaufen. Allerdings wird dieser Fall im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet und die entsprechenden MAC Adressen werden ebenfalls in die Liste mit den Ablehnungen aufgenommen. Sind die Rollen unterschiedlich, wird der Prozess fortgesetzt und es wird überprüft, ob (noch) genügend Plätze zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall wird die MAC Adresse in die entsprechende Liste aufgenommen. Andernfalls wird nach Übereinstimmungen basierend auf den jeweiligen Profileinstellungen und den entsprechenden Präferenzen gesucht. Alternativ könnte auch ein manueller Abgleich der Profilinformationen über eine Interaktion mit den Benutzern durchgeführt werden. Dabei haben sowohl der anbietende als auch der suchende Benutzer die Möglichkeit, das Gesuch bzw. das Angebot auszuschlagen. Um schließlich Übereinstimmungen bei den Routen zu den jeweiligen Zielen zu finden, werden zunächst optional die Linien verglichen um festzustellen, ob beide das gleiche Verkehrsmittel benutzen. Als Abfahrtszeit wird, falls nicht explizit angegeben, die nächste Möglichkeit angenommen, da der Fokus auf spontanen Fahrgemeinschaften liegt. Bezüglich des TicketShare Anwendungsfalls kann, basierend auf den lokal vorliegenden Haltestellen und Routenpläne, zum einen das entsprechende Ziel ausgewählt werden und zum anderen überprüft werden, ob die Hinzunahme des zweiten Ziels zu einer sinnvollen Ergänzung der Route führt, bei der kein Routensegment zweimal befahren werden darf. Ergibt sich eine sinnvolle Kombination beider Ziele, führt dies zu einer Übereinstimmung

des Routenabgleichs. Liegt der Zielpunkt des Suchenden hinter dem des Anbietenden, so besteht die Möglichkeit das Ticket der Person bzw. den Personen zu überlassen, die einen längeren Weg haben. Wurden zuvor bereits geeignete Kombinationen gefunden, müssen gegebenenfalls mehrere Ziele bei der Routenplanung berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.3.2). Im Fall von Fahrgemeinschaften im Individualverkehr muss als zusätzliche Information ein Schwellwert in Form des akzeptablen Umwegs in den Präferenzen angegeben werden, so dass eine entsprechende Entscheidung basierend auf der zusätzlichen Distanz oder der dafür notwendigen Zeit getroffen werden kann. Wurde keine Kombinationsmöglichkeit aus der Perspektive eines Suchenden gefunden, so wird die MAC Adresse des Anbieters vermerkt und damit im nächsten zu sendenden Paket berücksichtigt. Andernfalls steht eine Bestätigung des Anbieters aus und der Prozess muss gegebenenfalls wiederholt werden, da sich neben der Anzahl der freien Plätze auch die Anzahl der Ziele geändert haben können. Aus der Sicht eines Anbietenden wird die betreffende MAC Adresse ebenfalls in die Ablehnungsliste aufgenommen, wenn sich eine geeignete Kombinationsmöglichkeit ergeben hat. Hat sich eine Kombinationsmöglichkeit ergeben, kann der Anbieter manuell eine Ablehnung erwirken. Stimmt der Anbieter dem Gesuch zu, so wird auch das Ziel aus dem entsprechenden Paket in die Liste der eigenen Ziele aufgenommen. Neben der Reduzierung der verfügbaren Plätze wird ein zusätzliches Ziel angelegt und ab dem nächsten Paket des Anbietenden übermittelt. Auf diese Weise wird auch die Bildung von Fahrgemeinschaften mehrerer unabhängiger Personen mit unterschiedlichen Zielen unterstützt.

Verfahren zur Unterstützung dynamischer Fahrgemeinschaften

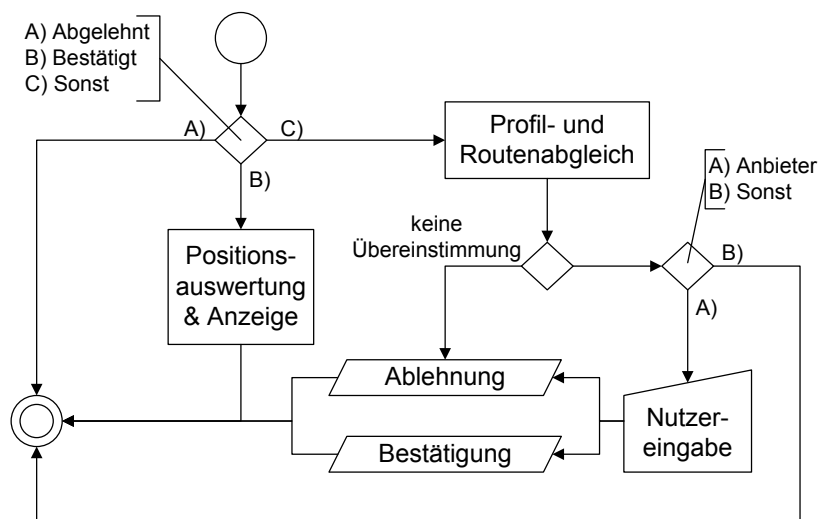


Abbildung 5.11: Vereinfachter Algorithmus zum Routenabgleich

Eine vereinfachte Darstellung des Algorithmus ist in Abbildung 5.11 zu sehen, bei dem zunächst das empfangene Paket eingelesen wird. Ist das Paket, bei dem es sich entweder um ein Angebot oder um ein Gesuch handelt, bekannt und ist die entsprechende MAC Adresse im `rejected` Tag enthalten, so ist dieses entweder vom Anbieter oder basierend auf dem Profil- und Routenabgleich abgelehnt worden und der Prozess endet (A). Entspricht die

eigene MAC Adresse einer der im Paket enthaltenen abgelehnten MAC Adressen, so wird zusätzlich die MAC Adresse des Senders in die eigene Ablehnungsliste aufgenommen. Somit ist gewährleistet, dass weder ein zusätzlicher Routenabgleich auf der Seite des Senders, sobald dieser gegebenenfalls das vom Empfänger gesendete Angebot überprüft, noch ein Routenabgleich auf der Seite des Empfängers durchgeführt wird. Ist das Paket bekannt und das Gesuch vom Anbieter bestätigt, so befindet sich die entsprechende MAC Adresse im `confirmed` Tag und es erfolgt die Positionsauswertung sowie deren die Anzeige (B). Ist das Paket unbekannt oder steht die Bestätigung des Anbieters noch aus, dann befindet sich die jeweilige MAC Adresse weder im `rejected` noch im `confirmed` Tag und es erfolgt der Profil- und Routenabgleich (C). Gegebenenfalls wird hierbei eine zusätzliche Berechnung durchgeführt, aber dafür ist gewährleistet, dass eventuelle Änderungen bezüglich der verfügbaren Plätze in jedem Fall berücksichtigt werden.

Implementierung

Der beschriebene Ansatz wurde prototypisch für die Android Plattform implementiert. Um eine spontane Interaktion zwischen den einzelnen Geräten zu ermöglichen, wurde die Ad hoc Funktionalität der integrierten WLAN Karte genutzt und zur Positionsbestimmung ein GPS Empfänger verwendet. Zu Testzwecken für das TicketShare Szenario wurde der Großraum München bzw. die schienengebundenen Verkehrsmittel inklusive der entsprechenden Haltestellen aus den OSM Projekt extrahiert. Zur Zeit der Implementierung war es mit den Standardwerkzeugen weder möglich eine Ad hoc Verbindung aufzubauen noch das Werkzeug `arping` [271] zu verwenden, welches zur Umsetzung des APIPA Protokolls notwendig ist. Aus diesen Gründen wurde eine modifizierte Firmware eingesetzt, um die erwähnte Funktionalität zu gewährleisten. Ein Broadcast Paket wird einmal pro Sekunde erzeugt und an die nächsten Nachbarn weitergeleitet. Dementsprechend wird auch die Position, sofern zuvor eine Übereinstimmung festgestellt und das Gesuch von einem Anbieter bestätigt wurde, aktualisiert und dem Benutzer angezeigt und mit einer Umgebungskarte hinterlegt. Für den Aufbau des Ad hoc Netzwerks wird zunächst eine zufällige IP Adresse erzeugt und mit Hilfe von `arping` überprüft, ob diese bereits existiert. Erhält die Kommunikationskomponente nach einer Sekunde keine Antwort auf das `arping` Kommando, wird die erzeugte Adresse zugewiesen. Um eine Netzwerkverbindung ohne eine zentrale Kontrollinstanz aufzubauen, müssen die Geräte über einige gemeinsame Parameter verfügen:

1. Der Service Set Identifier (SSID) muss für alle Teilnehmer gleich sein.
2. Das Frequenzband bzw. der Frequenzkanal, über den Pakete gesendet bzw. empfangen werden, muss auf den gleichen Kanal eingestellt werden.
3. Der UDP Port dient als virtueller Identifikator für den durch das Protokoll implementierten Dienst und muss ebenfalls bei allen Geräten gleich sein.

Um die Reichweite der Informationsaufbreitung zu erhöhen, wurde der erwähnte Multi-Hop Ansatz umgesetzt, indem die Time to Live (TTL) bei jedem empfangenen Paket um 1 reduziert und sofern diese größer 0 ist weitergeleitet wird. Dadurch kann zwar die Reichweite erhöht werden, aber mit einer steigenden Anzahl von Paketweiterleitungen steigt auch die Auslastung der Luftschnittstelle. Daher sollte der Wert für die TTL je nach Anwendungsfall und Anzahl der potenziellen Benutzer möglichst klein gehalten werden. Bei der prototypischen

```

  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <routes>
    <stations route="U1">
4      <station name="Olympia-Einkaufszentrum" />
      <station name="Georg-Brauchle-Ring" />
6      <station name="Westfriedhof" />
      <station name="Gern" />
8      <station name="Rotkreuzplatz" />
      [...]
10     <station name="Hauptbahnhof" />
      <station name="Sendlinger_Tor" />
12     [...]
      <station name="Mangfallplatz" />
14  </stations>
    <stations route="U2">
16     [...]
      <station name="Hauptbahnhof" />
18     <station name="Sendlinger_Tor" />
      [...]
20  </stations>
      [...]
22 </routes>
```

Listing 5.2: Beispiel einer Stationsliste zum Routenabgleich

Implementierung wurde auf den Einsatz eines Benutzerprofils verzichtet. Der Routenabgleich basiert auf OSM Daten, die im Gegensatz zur mobilen Anwendung zur Routenplanung mit öffentlichen Verkehrsmitteln (vgl. Abschnitt 5.1.1), als sortierte XML Dateien lokal hinterlegt sind, wie in Listing 5.2 dargestellt. Dabei ist es essentiell, dass diese Daten auf allen beteiligten Geräten gleich sind, da es sonst zu Inkonsistenzen bei dem verteilten Routenabgleich kommen kann. Durch die gleiche Bezeichnung der Haltestellen, die von unterschiedlichen Linien bedient werden, kann beim Durchsuchen von sich überschneidenden Stationslisten auch das Umsteigen von einer in eine andere Linie berücksichtigt werden.

5.1.2.3 Diskussion

Abgesehen von den Profilinformationen arbeitet der Algorithmus wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Der Prototyp wurde auf vier zur Verfügung stehenden Endgeräten installiert und auf die grundlegende Funktionalität getestet. Dazu wurden unterschiedliche Konfigurationen von Angeboten und Gesuchen mit unterschiedlichen Zielpunkten verwendet. Neben den Positionsdaten wurden zusätzlich Daten über die Ausrichtung des Geräts übermittelt. Diese Daten unterlagen allerdings sehr starken Abweichungen und führten zu keinem wesentlichen Mehrwert für den Benutzer. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass die Dienstbereitstellung und -nutzung auf Basis der ad hoc Kommunikation funktionsfähig ist. Im Fall von Kombinationsmöglichkeiten wurden die entsprechenden Benutzer angezeigt, und nach der Bestätigung durch den Anbieter wurde auch die Position anhand der GPS Koordinaten auf einer Karte zusammen mit der entsprechenden Distanz dargestellt. Die Ausführungszeit des vorgeschlagenen Algorithmus lag deutlich unter der Paketaktualisierungsrate von einer Sekunde und ist ausreichend, um die Position potenzieller Mitfahrer zu aktualisieren, um den tatsächlichen Aufenthaltsort ausfindig zu machen. Mit der begrenzten Anzahl an mobilen Endgeräten, war es allerdings nicht möglich die Kapazitätsgrenze des vorgeschlagenen

Ansatzes in der Praxis zu testen. Nach der Analyse in [144] liegt die theoretische Obergrenze bei ca. 130 simultan kommunizierenden Geräten bei einer Multi-Hop Strategie und einer Paketgröße von 400 Byte. Die maximale Reichweite, die mit den verwendeten Geräten in einem Hop auf einer freien und direkten Sichtlinie erreicht werden konnte, betrug ca. 130 Meter und liegt damit im erwarteten Bereich (vgl. Tabelle 4.1). Unter Verwendung des Multi-Hop Ansatzes könnte diese Distanz noch vergrößert werden, was zu einem ausreichenden Abdeckungsgebiet mit Bezug auf spontane Fahrten und der Anzahl der gleichzeitig kommunizierenden Geräte führt. Unter Verwendung des Routingverfahrens aus [285] kann auch das Szenario einer dezentralen Mitfahrzentrale für den Individualverkehr umgesetzt werden. Mit diesem Verfahren können die Distanzen unterschiedlicher Routen in Bruchteilen einer Sekunde ermittelt und auf diese Weise der notwendige Umweg festgestellt werden. Angenommen ein Fahrzeug bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h und legt demnach 8,3 Meter pro Sekunde zurück. Bei einer Distanz von 80 Metern zu einer stehenden Person und einer Verbindungsaufbauzeit von 3 Sekunden, verbleiben für den Profil- und Routenabgleich mehr als 6 Sekunden bis das Fahrzeug die Position des potenziellen Mitfahrers erreicht hat. Nach [285] erfolgt die Berechnung einer Route auf dem europäischen Straßennetz in unter 200 ms und erlaubt damit die 3 notwendigen Routenberechnungen zur Bestimmung des Umwegs innerhalb der Paketaktualisierungsrate. Liegt der Umweg unter dem vom Benutzer definierten Schwellwert, kommt es zu einer Übereinstimmung beim Routenabgleich und sofern die Akzeptanz automatisch erfolgt, verbleibt dem Fahrer eine Reaktionszeit von mindestens 4 Sekunden.

Der hier beschriebene Ansatz zur Unterstützung spontaner oder dynamischer Fahrgemeinschaften ist ein Beispiel für den Einsatz von Ortsinformationen im Bereich der Mobilität. Dabei werden die lokal verteilten Ortsinformationen genutzt, um eine Kooperation zwischen den teilnehmenden Benutzern zu ermöglichen. Im Gegensatz zu vielen verwandten Arbeiten wird hierbei zur Unterstützung der Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften zusätzlich die aktuelle Position der beteiligten Akteure in den Prozess eingebunden und trägt damit maßgeblich zum Informationsmehrwert bei. Das Ziel dynamischer Fahrgemeinschaften ist neben dem Erreichen des jeweiligen Ziels auch eine Senkung der hierfür nötigen Kosten. Die infrastruktur- und orts-unabhängige Anwendung kann somit bei entsprechenden Nutzerzahlen und entsprechenden Angeboten sowie Gesuchen zu einer höheren Auslastung einzelner Fahrzeuge beitragen. Eine bessere Auslastung durch die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen wirkt sich insgesamt reduzierend auf den städtischen Individualverkehr aus. Durch die lokale Kooperation zwischen den Benutzern kann dieser Ansatz eine verstärkte Nutzung von spontanen Gruppenfahrten oder Fahrgemeinschaften fördern. Die Unabhängigkeit von einer Kommunikationsinfrastruktur erlaubt zudem eine flexible Nutzung in anderen Bereichen. Im Zusammenhang mit Mobilitätsalternativen können auf Basis des vorgestellten Ansatzes beispielsweise auch entsprechend ausgestattete Fahrzeuge von Car-Sharing Anbietern einerseits auf ihre Position und Verfügbarkeit in der unmittelbaren Umgebung aufmerksam machen und andererseits zusätzliche Informationen über den aktuellen Preis oder die Nutzungsgebühr interessierten Benutzern zur Verfügung stellen.

5.2 Ein System zur Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs im Bereich des Verkehrsmanagements

Allgemein betrachtet setzt sich das Verkehrsmanagement, wie in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, mit zahlreichen Aspekten der Verkehrssteuerung auseinander. Hierfür werden dynamische Geschwindigkeitsanpassungen, Maßnahmen zur Zugangskontrolle und Steuerungsmöglichkeiten genutzt, um eine Verbesserung der Verkehrsabläufe zu erzielen. Bei Maßnahmen mit so genannten Push Effekten, handelt es sich in der Regel um Einschränkungen des Individualverkehrs. Im Gegensatz dazu kann eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens auch durch Maßnahmen mit einem Pull Effekt erreicht werden, die in der Regel auf der Förderung alternativer Mobilitätsangebote basieren. Mit Hilfe geeigneter Informationen können somit Anreize geschaffen werden, die eine verkehrsreduzierende Wirkung nach sich ziehen. Der Parkplatzsuchverkehr trägt zu einem erheblichen Anteil am gesamten Verkehrsaufkommen bei und kann, nach Informationen des Bundesumweltamtes, an verkaufsoffenen Samstagen bis zu 75% des gesamten innerstädtischen Verkehrs ausmachen [246]. Laut Untersuchungen von Transportation Alternatives [201] wird pro Jahr in einem Gebiet von 15 Blocks in Manhattans Upper West Side, also auf einem Gebiet von weniger als 1 km², eine Distanz von rund 590.000 km bei der Suche nach Parkplätzen zurückgelegt. In der Kölner Innenstadt könnten, nach einer Studie von BMW in Kooperation mit der RWTH Aachen, durch den Einsatz eines Parkplatzsuchsystems rund 14.500 km an einem durchschnittlichen Werktag eingespart werden [98]. Mit diesem Hintergrund wird im folgenden Abschnitt ein kollaboratives System zur Parkraumverwaltung vorgestellt, über das Informationen zur aktuellen Belegung von Straßenparkplätzen zur Verfügung gestellt werden. Mit Hilfe des Systems können verfügbare Parkplätze schneller gefunden werden, wodurch ein Beitrag zur Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs geleistet werden kann.

5.2.1 Kollaboratives Parkplatzmanagement

Bei diesem System, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde [60], kooperieren die Benutzer untereinander und unterstützen sich gegenseitig bei der Suche nach freien Parkplätzen. Auf Basis von mobilen Endgeräten wird ein Parkvorgang automatisch erkannt und die entsprechenden Informationen werden über eine zentrale Instanz anderen Benutzern zur Verfügung gestellt. Anhand dieser Informationen kann ein freier Parkplatz oder ein entsprechendes Gebiet direkt angefahren werden, wodurch der Suchverkehr reduziert wird. Zunächst folgt ein kurzer Überblick über die Architektur zur Realisierung eines kooperativen Parkplatzmanagementsystems, bevor auf die wesentlichen Komponenten eingegangen wird. Dabei stehen einerseits die Möglichkeiten der automatischen Erkennung von Parkvorgängen mit Hilfe von mobilen Endgeräten und andererseits die Validierung der gemeldeten Parkplätze im Vordergrund. Durch die Verwendung von handelsüblichen Mobiltelefonen sind die anfallenden Kosten für die Implementierung eines solchen Systems, beispielsweise im Vergleich zur Ausstattung der Straßenparkplätze mit Sensoren, sehr gering und die automatische Erkennung von Parkvorgängen sorgt für eine unkomplizierte Nutzung.

Im Zusammenhang mit der serverseitigen Validierung lassen sich zudem nicht regelkonforme Parkplätze ausschließen.

5.2.1.1 Systemüberblick

Das System orientiert sich am Client-Server Modell, wobei die Hauptaufgabe des Clients die Erkennung eines Ein- bzw. Ausparkvorgangs ist, der im Folgenden mit Parkvorgang bezeichnet wird. Die Aufgaben des Servers umfassen die Validierung, die Verwaltung und die Bereitstellung der von den Clients zur Verfügung gestellten Daten. Zur Erkennung eines Parkvorgangs kommen unterschiedliche Sensoren zum Einsatz, deren Messwerte auf dem mobilen Endgerät des Benutzers ausgewertet werden. Dieser Prozess erfolgt automatisch und das Ergebnis, in Form einer Wahrscheinlichkeit eines vollzogenen Parkvorgangs, wird zusammen mit zusätzlichen Informationen aus dem Entscheidungsprozess und gegebenenfalls dem Benutzerprofil an den Server übermittelt. Der Server unterscheidet drei Fälle, die unterschiedlich behandelt werden:

1. Einparkvorgang: ein Fahrzeug belegt einen (im System vorhandenen) Parkplatz, der gegebenenfalls aus dem System entfernt wird.
2. Ausparkvorgang: ein Fahrzeug verlässt einen Parkplatz der anderen Benutzern für eine Zeitspanne $t_{\text{gültig}}$ zur Verfügung gestellt wird.
3. Parkplatzanfrage: ein Client meldet den Bedarf eines Parkplatzes für eine bestimmte Region, wobei optional ein Benutzerprofil zur Filterung übertragen wird.

Der folgende Abschnitt befasst sich zunächst mit der clientseitigen Erkennung von Parkvorgängen und bezieht sich auf die ersten beiden Fälle. Bevor ein Parkplatz nach einem Ausparkvorgang anderen Benutzern zur Verfügung gestellt wird, wird dieser auf der Serverseite validiert, um die Bereitstellung von ungültigen oder regelwidrigen Parkplätzen zu vermeiden. Neben der Validierung werden auch Anfragen bezüglich des dritten Falls vom Server verarbeitet, wobei die zuletzt genannten Punkte im darauffolgenden Abschnitt behandelt werden.

Automatische Erkennung von Parkvorgängen

Einer der wesentlichen Aspekte des Systems ist die automatische Erkennung von Parkvorgängen mit Hilfe von modernen Smartphones. In diesen Geräten sind mittlerweile neben einem GPS-Empfänger auch zahlreiche Sensoren integriert, wie beispielsweise ein Beschleunigungssensor oder ein Kompass. Zusätzlich bieten diese Geräte auch unterschiedliche Kommunikationsschnittstellen an, die entweder zum Informationsaustausch mit der zentralen Entität verwendet werden oder über die entsprechende Geräte beispielsweise mit einem Musiksistem im Fahrzeug verbunden und als Freisprecheinrichtung genutzt werden können.

Die über Sensoren oder andere lokal verfügbare Informationsquellen gewonnenen Daten werden durch den Erkennungsprozesses

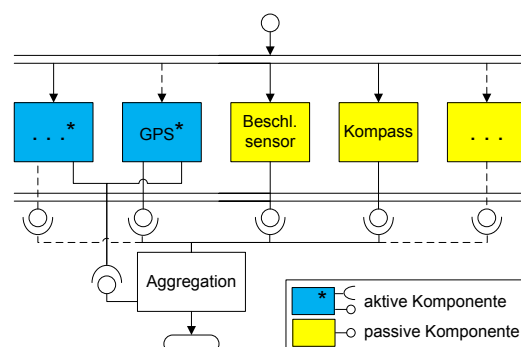


Abbildung 5.12: Schema zur Erkennung von Parkvorgängen

zusammengeführt und mit Hilfe einer Aggregationsfunktion der entsprechenden Komponente in eine Wahrscheinlichkeit überführt, mit der ein Parkvorgang stattgefunden hat. Überschreitet die berechnete Wahrscheinlichkeit einen festgelegten Schwellwert, wird das aktuelle Manöver als Parkvorgang gewertet und unter anderem die entsprechenden Positionsdaten an den Server übermittelt. Der Erkennungsprozesses mit Beispielen für beteiligte Komponenten ist in Abbildung 5.12 dargestellt, wobei zwischen aktiven und passiven Komponenten unterschieden wird. Aktive Komponenten sind in der Lage auf Basis des selbst ermittelten Wertes eine Überprüfung durch den Aufruf der Aggregationskomponente zu initiieren, wofür eine entsprechende Schnittstelle genutzt wird. Daneben bieten aktive Komponenten auch eine Schnittstelle zum Abruf von entsprechenden Informationen an. Somit kann die Aggregationskomponente auch Daten abrufen für den Fall, dass mehrere aktive Komponenten genutzt werden und lediglich eine davon die Aggregation initiiert. Passive Komponenten werden zwar parallel ausgeführt, speichern aber lediglich die relevanten Daten in einer Historie. Sie stellen eine Schnittstelle bereit, die von der Aggregationskomponente genutzt wird, um die notwendigen Daten abzurufen. Die Beschreibungen der genannten Schnittstellen sind in Tabelle 5.1 angegeben. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten vorgestellt, mit denen sich

Schnittstelle/Methode	Eingabe [Typ]	Ausgabe [Typ]
Aggregationskomponente		
initAggregation()	Zeitstempel,ID,Value,Parameter [Timestamp,Integer,Float,StringList]	OK [String]
Beschreibung: Mit dieser Methode werden der Zeitpunkt (Zeitstempel), die Komponenten ID (ID), der Erkennungswert (Value) und zusätzliche Parameter an die Aggregationskomponente übergeben, die den Erhalt bestätigt. Der Zeitpunkt ist notwendig, da sich abhängig von der aktiven Komponente der tatsächliche Parkvorgang auch schon früher ereignet haben könnte. Somit kann beim Abruf der Daten von den passiven Komponenten das relevante Intervall bestimmt werden. Anhand der ID kann die Aggregationskomponente die Spezifikation der Komponentenparameter auswählen und diese zur Weiterverarbeitung nutzen. Insgesamt wird durch den Aufruf der eigentliche Aggregationsprozess initiiert, bei dem die Informationen von den anderen Komponenten über eine entsprechende Schnittstelle abgerufen werden.		
Erkennungskomponenten		
provideData()	Zeitstempel [Timestamp]	Aggregate,ID,Value,Parameter [Bool,Integer,Float,StringList]
Beschreibung: Mit dieser Methode ruft die Aggregationskomponente die für die Auswertung notwendigen Parameter der vorhandenen Komponenten ab. Hierfür wird zusätzlich der Zeitpunkt in Form eines Zeitstempels übermittelt, an dem möglicherweise ein Parkvorgang stattgefunden hat. Dabei gibt Aggregate an, ob der entsprechende Wert zur Aggregation verwendet werden soll oder ob die Daten lediglich als ergänzende Informationen an den Server übermittelt werden. Die übrigen Parameter entsprechen denen, die auch bei der initAggregation() Methode übermittelt werden.		

Tabelle 5.1: Schnittstellenbeschreibung der Komponenten

entweder ein Parkvorgang direkt erkennen lässt oder die zumindest indirekt zur Unterstützung des Erkennungsprozesses beitragen können.

GPS-Komponente: Die Erkennung eines Parkmanövers mit Hilfe der Position basiert auf der Veränderung des Ortes. Unterliegt die Positionsänderung in einem bestimmten Zeitintervall starken Abweichungen, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Benutzer in einem

fahrenden Fahrzeug befindet. Ist, unter Berücksichtigung der Signal uktionen, die Änderung über ein bestimmtes Zeitintervall nur minimal, so könnte das Fahrzeug entweder an einer Ampel stehen oder hat ein Parkmanöver abgeschlossen. Damit eine signifikante Veränderung des Ortes registriert werden kann, wird nicht nur die aktuelle Position berücksichtigt, sondern eine Historie über einen Zeitraum t_{hist} erzeugt. Dabei merkt sich die Komponente auch markante Punkte, die auf einen Parkvorgang hindeuten, wie beispielsweise solche, an denen sich die Position im entsprechenden Zeitraum kaum oder geringfügig verändert hat. Auf diese Weise kann die tatsächliche Position des Parkvorgangs zu einem späteren Zeitpunkt abgerufen und an den zentralen Server übermittelt werden. Zudem lassen sich somit kürzere Standzeiten, wie beispielsweise bei Stauungen oder Ampeln, erkennen. Neben der reinen Positionsveränderung kann auch die aufgezeichnete Geschwindigkeit Aufschlüsse über die Art der Fortbewegung geben. Bewegt sich ein Benutzer zunächst relativ langsam zu einem bestimmten Punkt, verweilt dort eine kurze Zeit und bewegt sich anschließend mit einer vergleichsweise hohen Geschwindigkeit, so könnte dies auf einen Ausparkvorgang zurückzuführen sein. Im Rahmen des Erkennungsvorganges werden von dieser aktiven Komponente Werte zwischen 0 (kein Parkvorgang) und 1 (Parkvorgang) erzeugt. Abhängig von den Aufzeichnungen aus der Historie können hierbei auch Abstufungen sinnvoll sein.

Komponente für Beschleunigungssensoren: In den Abbildungen 5.13 sind typische Muster für einen parallelen und orthogonalen Parkvorgang dargestellt. Mit Hilfe der Beschleunigungssensoren, die im Zusammenhang mit Mobilität bisher zur Erkennung des Fortbewegungsmittels verwendet wurden [143, 275, 298, 319, 332], können entsprechende Muster ausgewertet und zum Festellen von Parkvorgängen genutzt werden. Anstelle der

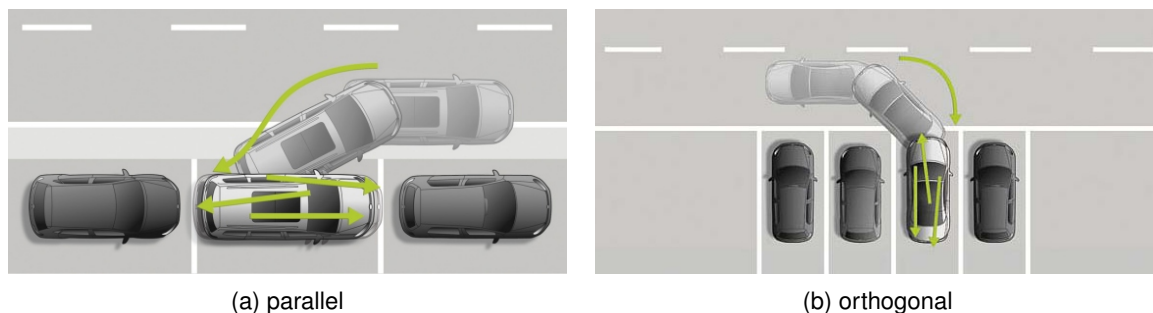


Abbildung 5.13: Typische Parkmuster aus [257]

typischen Parkmuster kann hierfür, wie bereits erwähnt, auch die Art der Fortbewegung verwendet werden. Bei der Erkennung mit Hilfe der Beschleunigungssensoren werden die aufgezeichneten Messwerte mit den Mustern klassischer Parkvorgänge verglichen. Da es sich hierbei um eine passive Komponente handelt, wird der Prozess zum Musterabgleich erst durch die Anfrage der Aggregationskomponente und basierend auf den Daten des relevanten Zeitintervalls durchgeführt. Wurde eine ausreichend hohe Ähnlichkeit festgestellt, dann deutet dies auf ein Parkmanöver hin. Auch hierbei sind diverse Abstufungen denkbar, wobei die Wahrscheinlichkeit in einem Wertebereich zwischen 0 und 1 abgebildet wird.

Kompass-Komponente: Mit Hilfe des integrierten, digitalen Kompasses lässt sich die relative Richtungsänderung feststellen. Die Veränderung der absoluten oder die Abweichung von der relativen Bewegungsrichtung kann dabei lediglich zur Unterstützung der zuvor erwähnten Erkennungsmethoden herangezogen werden. Nur anhand der Richtungsänderung, ohne weitere Informationen über die Ortsveränderung oder die Geschwindigkeit, kann keine Aussage über ein Parkmanöver erfolgen. In Tabelle 5.2 sind die unterschiedlichen Parkplatzarten in Abhängigkeit der relativen Winkeländerung zur Fahrtrichtung eingetragen. Die Fahrtrichtung kann dabei mit Hilfe der Historie der GPS Daten bestimmt werden. Die Parkplatzart und die Fahrtrichtung werden nun von der Aggregationskomponente zusammen mit der geeigneten Parkposition an den Server zur Validierung übermittelt. Anhand dieser Informationen können zusätzliche Metadaten erzeugt und zur Filterung bei einer Suchanfrage verwendet werden. Zudem können die Daten über die Parkplatzart der Kompass Komponente mit denen der Beschleunigungssensoren verglichen werden, wobei anhand der Art bei der Validierung Rückschlüsse auf eventuell vorhandene Regeln gezogen werden können.

Parkplatzart	relative Winkeländerung
Parallel	0°-25°
Schräg	26°-75°
Orthogonal	76°-90°

Tabelle 5.2: Parkplatzart und relative Winkeländerung

Weitere Komponenten: Mittlerweile befindet sich in vielen Fahrzeugen ein USB Anschluss, der auch zum Laden eines Gerätes genutzt werden kann. Falls das Endgerät an die Stromversorgung angeschlossen wird, könnte davon ausgegangen werden, dass ein Ausparkvorgang unmittelbar bevorsteht. Im umgekehrten Fall, die Stromversorgung wird getrennt und die Position verändert sich nur unwesentlich, kann das auf einen abgeschlossenen Einparkvorgang hindeuten. Allerdings könnte das Gerät auch während der Fahrt verbunden bzw. getrennt werden, weshalb diese Erkennungsart nur mit einer Kombination weiterer Sensoren sinnvoll ist. Durch die Aggregationsfunktion und durch eine geeignete Gewichtung kann der Fall ausgeschlossen werden, dass das Gerät während der Fahrt angeschlossen oder getrennt wurde. Eine weitere Möglichkeit bieten einige Autoradios, die von Smartphones über die Bluetooth Schnittstelle als Freisprechsystem genutzt werden können. Sobald das Endgerät mit der Freisprecheinrichtung gekoppelt wird, könnte dies auf einen baldigen Ausparkvorgang hindeuten. Falls dagegen die Verbindung aktiv getrennt wird bzw. das Autoradio außer Reichweite ist, könnte ein Einparkvorgang stattgefunden haben. Bei einem Verbindungsabbruch wird von der GPS Komponente unter anderem die letzte markante Position zur Verfügung gestellt, da in diesem Fall davon ausgegangen werden kann, dass sich der Fahrer bereits von seinem Fahrzeug entfernt hat und die aktuelle Position nicht mit der tatsächlichen Parkposition übereinstimmt. Neben den angesprochenen Möglichkeiten werden in Zukunft auch noch weitere Schnittstellen zwischen Fahrzeug und mobilem Endgerät hinzukommen, die weitere Informationsquellen, beispielsweise in Form von Abstandssensoren, Telemetriedaten oder dem Parkassistenten, verfügbar machen. Über geeignete Komponenten können diese Informationen in den vorgestellten Erkennungsprozess integriert und für die automatische Parkvorgangserkennung verwendet werden. Eine Voraussetzung für zusätzliche Erkennungskomponenten ist die Bereitstellung eines Wahrscheinlichkeitswertes zwischen 0 und 1, der als Indikator für einen Parkvorgang genutzt wird.

Aggregation der Messwerte

Durch den Einsatz einer Aggregationsfunktion können die einzelnen, zuvor vorgestellten, lokalen Erkennungswerte der unterschiedlichen Sensoren zu einem globalen Erkennungswert zusammengefasst werden. Die am häufigsten verwendete Aggregation ist die gewichtete Summe, bei der jeder lokale Erkennungswert ($park_i$), abhängig vom zugewiesenen Gewicht (ω_i), die Erkennung eines Parkvorgangs beeinflussen kann. Neben der gewichteten Summe ist auch die Verwendung anderer Aggregationsfunktionen möglich, die in [297] beschrieben sind. In diesem Fall bietet sich die Minkowski Aggregation an, die für $p = 1$ der gewichteten Summe entspricht und damit eine Verallgemeinerung dieser ist. Mit dem Parameter p kann hierbei entweder der Einfluss des größten ($p > 1$) oder kleinsten ($p < 1$) lokalen Erkennungswertes zusätzlich verstärkt werden.

$$\pi(park_1, \dots, park_n, \omega) = \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot park_i^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (5.1)$$

Stellt beispielsweise die GPS Komponente einen Parkvorgang auf Grund der geringen Positionsänderung oder einer signifikanten Geschwindigkeitsänderung in einem entsprechenden Zeitintervall fest, so initiiert diese den Aggregationsprozess, indem neben der Komponenten ID auch der ermittelte Wahrscheinlichkeitswert eines Parkvorgangs sowie die Parameter übergeben werden. Bei den folgenden Formeln wird zur besseren Darstellung ein Punkt zur Trennung der Nachkommastelle verwendet.

```
initAggregation(2012-10-22 18:32:16, 0.6,  
"Point:48.15273,11.57971;HDOP:6m;AvgPosChange:8m;AvgSpeed:0.3km/h")
```

Nach diesem Aufruf werden die Informationen der anderen Komponenten über die entsprechende Schnittstelle abgefragt, wobei die Aggregationskomponente Rückgabewerte der folgenden Form erhält:

```
Beschleunigungssensor: {1, 2, 0.8, "Type:orthogonal"}  
Kompass: {0, 3, 0.5, "RelOrientation:85;Type:orthogonal"}
```

In diesem Beispiel beträgt die lokale Wahrscheinlichkeit der GPS Komponente 0,6 und die der Beschleunigungssensor Komponente 0,8. Der Wert der Kompass Komponente soll nicht für die Aggregation verwendet werden und wird im Anschluss zur serverseitigen Parkplatzvalidierung übermittelt. Mit einem Gewichtungsvektor $\omega = (0,6 \quad 0,4)$ und $p = 4$ ergibt sich durch Einsetzen in Formel 5.1:

$$\begin{aligned} \pi(park_{GPS}, park_{Beschl.}, \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{pmatrix}) &= \pi(0.6, 0.8, \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{pmatrix}) = (0.6 \cdot 0.6^4 + 0.4 \cdot 0.8^4)^{\frac{1}{4}} = \\ &= 0.701090742 \end{aligned}$$

Der berechnete Wert wird im Anschluss als Wahrscheinlichkeit für einen Parkvorgang verwendet, und sobald dieser einen geeigneten Schwellwert übersteigt, werden die Positionsdaten zusammen mit den zusätzlichen Informationen an den Server übermittelt, wie in Listing 5.3 veranschaulicht. Im nächsten Abschnitt wird einerseits die Validierung der übertragenen Informationen behandelt und andererseits auf die Verteilung der Parkplatzinformationen eingegangen.

```
1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <parkspacedetected>
3    <profile>
4      <car Size=4.77m Type=Volkswagen Passat />
5      [...]
6    </profile>
7    <parkspacedata>
8      <gps Lat=48.15273 Lon=11.57971>
9        HDOP=6m; AvgPosChange=8m; AvgSpeed=0.3km/h
10     </gps>
11     <accelerometer>
12       Value=0.8; Type=orthogonal
13     </accelerometer>
14     <orientation>
15       Value=0.5; RelOrientation=85; Type=orthogonal
16     </orientation>
17   </parkspacedata>
18 </parkspacedetected>
```

Listing 5.3: Beispiel einer Nachricht für einen erkannten Parkvorgang

Parkplatzvalidierung und Parkplatzsuche

Nachdem ein Parkvorgang von einem Client erfolgreich erkannt und die entsprechenden Informationen übermittelt wurden, wird ein frei gewordener Parkplatz auf der Seite des Servers zunächst noch auf seine Validität überprüft. Falls ein Parkplatz besetzt wurde, wird überprüft, ob es sich dabei um einen im System vorhandenen Parkplatz handelt, der gegebenenfalls als besetzt markiert wird. Die dritte Möglichkeit ist die Suche nach freien Parkplätzen, die unabhängig von einem Parkvorgang durch den Benutzer initiiert werden kann. Im Folgenden wird zunächst auf den Prozess der Validierung eingegangen und anschließend die Suche nach Parkplätzen näher erläutert. Dabei wird kurz auf den Vorgang des Mappings, zur Suche im System vorhandener Parkplätze im Falle eines Ausparkvorgangs, im Zusammenhang mit der Validierung eingegangen.

Validierung: Bevor ein frei gewordener Parkplatz anderen Nutzern zur Verfügung gestellt wird, soll dieser vom System einerseits auf seine Gültigkeit überprüft und andererseits mit geeigneten Zusatzinformationen versehen werden. Durch die Validierung soll beispielsweise das Problem von Falschparkern und damit die Anzahl der nicht regelkonformen Parkplätzen im System minimiert werden. Dabei wird die übermittelte Position des Parkplatzes mit Hilfe der OSM Daten auf geltende Parkregeln untersucht. Beispiele für solche Regeln sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Weitere Parkregeln oder zusätzliche Angaben können mit Hilfe des Tags `parking` definiert werden. Die eigentliche Validierung findet in zwei Schritten statt:

1. Mapping der empfangenen Geokoordinaten auf Koordinaten des nächstgelegenen Straßenabschnitts.
2. Filterung der vorhandenen Parkregeln aus den OSM Daten und Verknüpfung des Parkplatzes mit relevanten Informationen.

Beim Mapping der Geokoordinaten wird die Position auf dem Straßenabschnitt gewählt, dessen Länge vom Lot zwischen Punkt und Straße am kürzesten ist und diese schneidet. Damit werden zwar die Messungenauigkeiten der Positionsermittlung über GPS nicht vermieden, aber zumindest verringert. Als zusätzliche Information wird die übermittelte Positionsabweichung bzw. die Horizontalgenauigkeit (englisch: Horizontal Dilution of Precision, HDOP) gespeichert.



Schild	OSM Tag	Beschreibung
	parking:lane:right=inline parking:condition:right=residents parking:condition:right:residents=P7	Auf der rechten Seite kann nur mit dem Parkausweis P7 parallel (inline) auf dem Randstein geparkt werden.
	parking:lane:left=orthogonal parking:condition:left=disc parking:condition:left:maxstay=1h parking:condition:left:time_interval=Mo-Fr 9:00-18:00, Sa 9:00-14:00	Auf der linken Seite ist in der Zeit von 9 bis 18 Uhr (Mo-Fr) und 9 bis 14 Uhr (Sa) die maximale Parkdauer auf 1 Stunde beschränkt.

Tabelle 5.3: Beispiele für Parkregeln in OpenStreetMap

Wird ein Einparkvorgang registriert und an den Server übermittelt, werden die übertragene und die im System vorhandene Abweichung genutzt, um über eine Umkreissuche festzustellen, ob es sich um einen im System vorhandenen Parkplatz handelt. Ist dies der Fall, wird der entsprechende Parkplatz aus dem System entfernt, so dass dieser bei künftigen Anfragen nicht mehr zur Verfügung steht. Im zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Validierung, indem alle vorhandenen Parkregeln der Reihe nach überprüft werden. Zuerst werden die Regeln auf vorhandene Zeitintervalle und deren Gültigkeit untersucht und mit der aktuellen Systemzeit verglichen. Bei Parkverboten oder privaten Parkplätzen wird die Validierung abgebrochen, da es sich um keinen regulären bzw. öffentlichen Parkplatz handelt. Bei Anwohnerparkplätzen oder dem Parken mit Parkscheibe werden die entsprechenden Zusatzinformationen, wie der benötigte Parkausweis oder die maximale Parkzeit und eventuelle Kosten, erfasst. Letztere werden für die Suche nach Parkplätzen abhängig von den Präferenzen bzw. Profilinformationen benötigt. Sind der Besitz des entsprechenden Ausweises, die gewünschte Parkdauer oder die maximalen Kosten pro Stunde im Profil des Benutzers hinterlegt, können passende Parkplätze selektiert und angeboten werden. Sofern Angaben über die Art des Parkplatzes (parallel, orthogonal oder schräg) vorhanden sind, die mit Hilfe des Beschleunigungssensors oder des Kompasses registriert wurden, kann anhand der OSM Daten zusätzlich überprüft werden, ob an der übermittelten Position entsprechende Parkplätze vorhanden sind. Gegebenenfalls lassen sich dadurch auch Rückschlüsse auf die Straßenseite ziehen, wenn unterschiedliche Parkplatzarten ausgewiesen sind. Ergibt die Validierung einen gültigen Parkplatz, wird dieser mit den zusätzlichen Informationen und einem Zeitstempel in einer Datenbank gespeichert. Der Zeitstempel wird benötigt, damit ein Parkplatz nach einer angemessenen Zeit aus dem System entfernt werden kann, da Parkplätze auch von anderen Autofahrern, die das System nicht nutzen, belegt worden sein können. Dadurch sollen die falsch-positiv Meldungen, also ein freier Parkplatz wird angezeigt, obwohl dieser nicht mehr zur Verfügung steht, minimiert werden. Da das Parkaufkommen abhängig von der Uhrzeit, dem Tag und dem Stadtteil variiert [108], sollte hierbei ein dynamischer Parameter als Multiplikator zur Bestimmung der Gültigkeit der Parkplatzinformation im System verwendet werden. Des Weiteren unterscheidet sich die durchschnittliche statistische Parkdauer abhängig vom Stadtteil und wird mit Hilfe eines entsprechenden Multiplikators berücksichtigt. Ein Beispiel für die Stadt München ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Mögliche Multiplikatoren unter Berücksichtigung der Tageszeit

für den Stadtteil Allach sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Die Gültigkeitsdauer eines freien Parkplatzes kann somit basierend auf statistischen Daten ermittelt werden:

$$\text{Gültigkeitsdauer}_{\text{Stadtteil}} = \text{Basisdauer} \times \text{Stadtteilmultiplikator} \times \text{Tageszeitmultiplikator}_{\text{Stadtteil}} \quad (5.2)$$

Durch Formel 5.2 ergibt sich bei einer Basisdauer von 10 Minuten für den Stadtteil Allach um

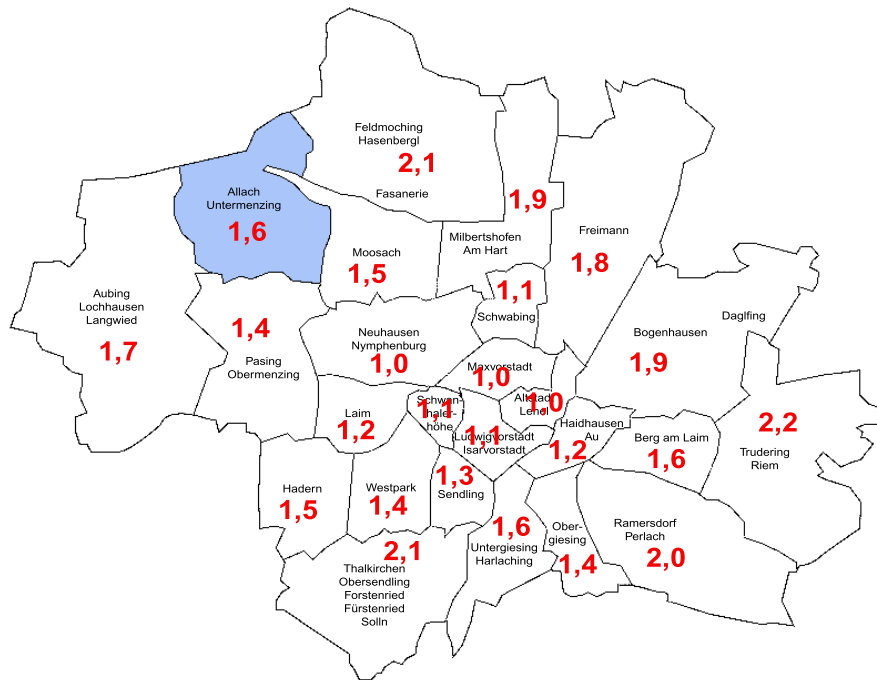


Abbildung 5.14: Fiktive Multiplikatoren für die Gültigkeitsdauer nach Stadtteil

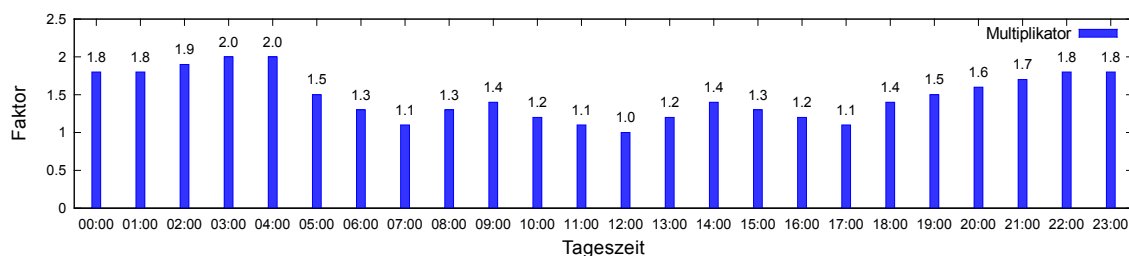


Abbildung 5.15: Fiktive Multiplikatoren für die Gültigkeitsdauer nach Tageszeit

17:00 Uhr anhand der Multiplikatoren aus den Abbildungen 5.14 und 5.15 eine Gültigkeitsdauer von:

$$\text{Gültigkeitsdauer}_{\text{Allach}} = 10 \text{ Minuten} \times 1,6 \times 1,1 = 17,6 \text{ Minuten} \quad (5.3)$$

Neben der Gültigkeit, einem Zeitstempel und den Positionsdaten werden optional auch die Größe des Fahrzeuges und eventuell weitere Informationen aus einem Benutzerprofil sowie den OSM Daten in der Datenbank vermerkt, die bei einer Suchanfrage berücksichtigt werden können.

Suche nach Parkplätzen Die freien bzw. gültigen Parkplätze werden interessierten Benutzern zur Verfügung gestellt. Damit eine feingranulare Verteilung der Informationen

erfolgen kann, überträgt der Benutzer neben der Zielposition optional die erwartete Ankunftszeit sowie weitere Daten aus dem Benutzerprofil. Eine Anfrage mit geeigneten Profilinformatoren ist in Listing 5.4 dargestellt. Da die Position von Parkplätzen, die in einer Datenbank hinterlegt

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <parkrequest>
3    <profile>
4      <car Size=3.65m Type=BMW Mini />
5      <parkingpermit>P7</parkingpermit>
6      [...]
7    </profile>
8    <destination>
9      <address>
10       Akademiestraße 15, 80799 München
11     </address>
12     <eta>2012-10-22 18:42</eta>
13   </destination>
14 </parkrequest>

```

Listing 5.4: Beispiel einer Parkplatzanfrage

sind, als GPS Koordinaten vorliegen, müssen der Adressinformation (Zeile 10) mit Hilfe des so genannten Geocoding die entsprechenden Koordinaten zugewiesen werden. Basierend auf den Koordinaten können vorhandene Einträge aus der Datenbank selektiert werden, die sich in der Nähe der Zielposition befinden und gegebenenfalls eine geeignete Größe haben. In diesem Beispiel hat der Benutzer den Parkausweis *P7* (Zeile 5, *parkingpermit*), so dass auch Parkplätze mit einer entsprechenden Einschränkung bei der Auswahl in Frage kommen. Abhängig von der erwarteten Ankunftszeit (Zeile 12, *eta*) können auch Parkplätze, deren Gültigkeitsdauer zu diesem Zeitpunkt überschritten ist, ignoriert werden. Auf diese Weise werden nur Parkplatzdaten übermittelt, die den Präferenzen des Benutzers entsprechen und

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <parkreply>
3    <options>
4      <parkspacedata>
5        <gps Lat=48.153446 Lon=11.578058 />
6        <type>inline</type>
7        <size>4.25m</size>
8        <conditions>
9          left-residents-P7
10       </conditions>
11       <timeperiod>2012-10-22 18:39-18:51</timeperiod>
12     </parkspacedata>
13     <parkspacedata>
14       <gps Lat=48.15273 Lon=11.57971 />
15       <type>orthogonal</type>
16       <size>4.77m</size>
17       <conditions>
18         left-disc
19         left-maxstay:1h
20         left-time_interval:Mo-Fr 9:00-18:00, Sa 9:00-14:00
21       </conditions>
22       <timeperiod>2012-10-22 18:35-18:47</timeperiod>
23     </parkspacedata>
24     [...]
25   </options>
26 </parkreply>

```

Listing 5.5: Beispiel einer Antwort in Form von Parkplatzdaten des Servers

sich in der Nähe des eigentlichen Ziels befinden. Eine mögliche Antwort des Servers ist in Listing 5.5 dargestellt. Basierend auf den Positionsdaten (Zeilen 5 bzw. 14, `gps`) und den Zeitintervallen der Gültigkeit (Zeilen 11 bzw. 22, `timeperiod`) können die verfügbaren Parkplätze auf dem Endgerät des Benutzers angezeigt werden. Damit keine permanente Verbindung zwischen Client und Server bestehen muss, wird die Anfrage in regelmäßigen Abständen wiederholt, so dass relevante Änderungen, wie das Freiwerden oder Besetzen eines in Frage kommenden Parkplatzes, berücksichtigt werden.

5.2.1.2 Prototyp und Ergebnisse einer Nutzerstudie

Das erläuterte Konzept wurde prototypisch implementiert und einer Nutzerstudie unterzogen. Als Client wurde ein Smartphone mit Android Betriebssystem verwendet, welches über einen GPS Empfänger, Beschleunigungssensoren und einen elektronischen Kompass verfügt. Als Server wurde ein handelsüblicher Desktop Computer eingesetzt auf dem sowohl eine PostgreSQL Datenbank mit GIS Erweiterung zur Verwaltung der OSM Daten als auch eine MySQL Datenbank zur Verwaltung der Parkplatzdaten installiert wurden.

Prototyp

Zur Darstellung der Parkplätze auf dem Endgerät wurde auf die Bibliothek OSMDroid [96] zurückgegriffen, die es ermöglicht Views, Overlays und ItemizedOverlays über die aktuelle Karte zu legen. Letztere eignen sich besonders dafür, beliebige Symbole anhand der GPS Koordinaten einzufügen. Nachdem der Fokus der Implementierung auf dem potenziellen Nutzen der Anwendung lag, beschränkte sich der Erkennungsvorgang lediglich auf die Positionsveränderung und damit auf die aktive GPS Komponente. Diese hat zwei Zustände: *Geparkt* und *Fahrend*. Zusätzlich wird pro Sekunde ein Eintrag in einer Historie hinterlegt, der aus den GPS Koordinaten und der relativen Positionsveränderung im Vergleich zum vorigen Eintrag zusammensetzt. Die Historie besteht dabei aus maximal 240 Einträgen in Form eines first in last out Puffers, so dass sich bei dieser Komponente ein Wert von $t_{hist} = 240$ Sekunden ergibt. Im Zustand *Fahrend* wird die Historie lediglich auf einen Einparkvorgang untersucht, wobei zur Erkennung eine Zeit von 2 Minuten festgelegt wurde, in der sich die absolute Position nicht mehr als 7 Meter verändern darf. Hat sich die Position der letzten 120 Einträge kaum verändert, geht das System in den Zustand *Geparkt* über. In diesem Zustand wird die Historie auf einen Ausparkvorgang untersucht. Beträgt die durchschnittliche Geschwindigkeit der letzten 120 Einträge mehr als 5 km/h, wird in der gesamten Historie ein Intervall von 120 Einträgen gesucht, in dem die durchschnittliche Geschwindigkeit unter 5 km/h betrug. Existiert kein solches Intervall, wird das aktuelle Manöver nicht als Ausparkvorgang gewertet. Hierbei wird angenommen, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit im Stadtverkehr inklusive der Ampelphasen über 5 km/h liegt. Wurde ein entsprechendes Intervall gefunden, so werden in diesem Intervall 30 zusammenhängende Einträge gesucht, bei denen sich die absolute Position um weniger als 7 Meter verändert hat. Existieren 30 Einträge, die diese Bedingung erfüllen, wird ein Ausparkvorgang erkannt und der Zustand ändert sich auf *Fahrend*. Zur Glättung der tatsächlichen Position werden die entsprechenden Koordinaten gemittelt. Für den Parkzeitpunkt wird der späteste Zeitpunkt der 30 Einträge verwendet und im Anschluss an den Server übermittelt. Die Informationen über die Parkplätze in einem Stadtteil von München

(vgl. Abbildung 5.16) wurden nach dem vorgeschlagenen Schema (vgl. Tabelle 5.3) manuell in die Postgres/PostGIS Datenbank zu den bestehenden OSM Daten hinzugefügt. Der Server wartet permanent auf eingehende Socketverbindungen und überprüft, ob es sich um einen Ein-, einen Ausparkvorgang oder eine Suchanfrage handelt. Dementsprechend wird die jeweilige Methode aufgerufen: um einen freien Parkplatz gegebenenfalls aus dem System zu entfernen, um einen frei gewordenen Parkplatz zu validieren oder um eine Suche einzuleiten, die eine Liste mit freien Parkplätzen liefert. Zusätzlich überprüft der Server in regelmäßigen Abständen das Alter der bereits eingetragenen Parkplätze und entfernt diese gegebenenfalls. Im Rahmen der Nutzerstudie wurde hierfür eine Gültigkeitsdauer von 10 Minuten veranschlagt. Auf die Verwendung der im vorigen Abschnitt erwähnten Multiplikatoren wurde verzichtet.

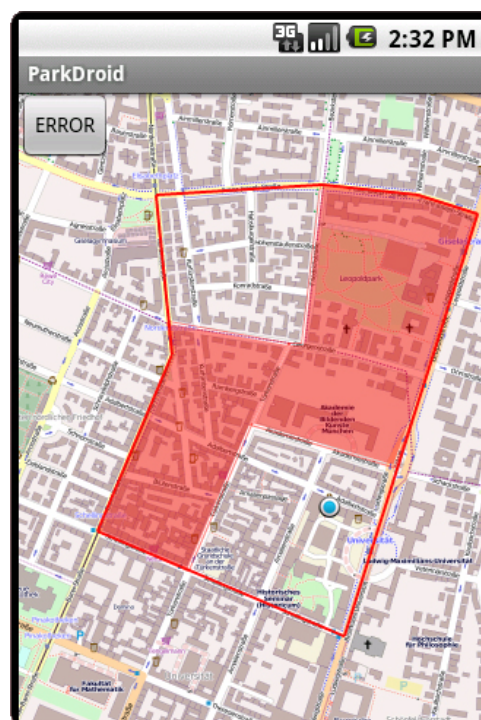
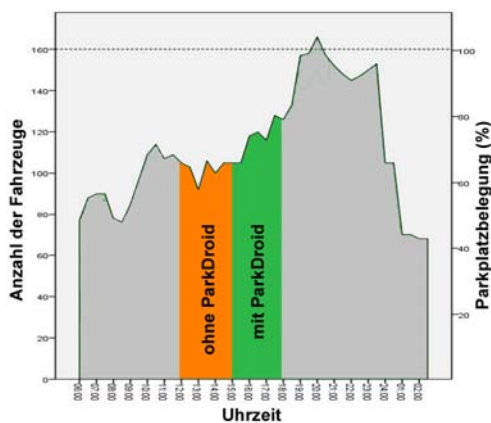


Abbildung 5.16: Testgebiet, P 2

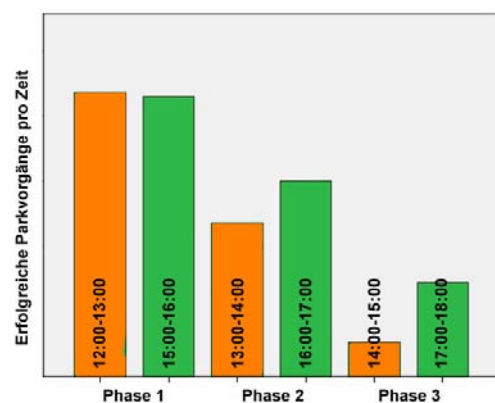
Diskussion

Der Prototyp wurde in einer Nutzerstudie mit 8 Probanden getestet. Die Suchanfragen wurden im Rahmen der Studie periodisch durchgeführt, wobei die Parkplatzinformationen für das gesamte Gebiet einmal pro Minute aktualisiert wurden. Die Studie wurde dabei in 3 Phasen unterteilt. In der ersten Phase stand das gesamte Testgebiet für die Suche nach Parkplätzen zur Verfügung. In den Phasen 2 und 3 musste der Parkvorgang in zwei bzw. einem der vier Teilgebiete stattfinden. Die Teilgebiete in den letzten beiden Phasen wurden nach jedem erfolgreichen Parkvorgang zufällig neu bestimmt. Durch diese Einschränkungen sollte ein realistischeres Parkplatzsuchverhalten simuliert werden. Die Dauer jeder Phase (P 1-3) betrug eine Stunde, in der die Probanden eine möglichst große Anzahl an Parkvorgängen in den jeweiligen Gebieten absolvieren sollten. Daher konnte auf die Angabe einer Zielposition im Rahmen der Nutzerstudie verzichtet werden. Des Weiteren wurden die drei Phasen zunächst ohne die Unterstützung der Funktionalität des Prototyps und lediglich mit der Anzeige der erlaubten Gebiete durchgeführt, um Referenzdaten zu erhalten (Test 1). Im Anschluss erfolgte die Durchführung der drei Phasen mit Hilfe der Anwendung, wobei zusätzlich die als frei gemeldeten Parkplätze angezeigt wurden (Test 2). Im ersten Test wurden insgesamt 156 Parkvorgänge (P 1: 72, P 2: 50, P 3: 34) registriert und im zweiten Test 155 (P 1: 70, P 2: 50, P 3: 35). Insbesondere die Zeiten aus den Phasen 2 und 3 spiegeln die Suchdauer von ca. 10 Minuten wieder, die im Rahmen einer Umfrage des Österreichischen Automobil-, Motorrad- und Touring Club [218] erfasst wurden und damit den Schluss auf realistische Testszenarien zulassen. Die durchschnittlichen Zeiten, bis ein Parkplatz im ersten Test gefunden wurde, betrugen 6 Minuten 40 Sekunden (P 1), 9 Minuten 36 Sekunden (P 2) und 14 Minuten 36 Sekunden (P 3). Diese sind vergleichbar mit den Zeiten aus Test 2 von 6 Minuten 51 Sekunden (P 1), 9 Minuten 36 Sekunden (P 2) und 13 Minuten 43 Sekunden (P 3). Bei

diesen Ergebnissen wurde die durchschnittliche Parkplatzbelegung, die abhängig von der Tageszeit starken Schwankungen unterliegt, nicht berücksichtigt. Im Hinblick auf die Belegung oder die Parkplatzauslastung, wurden in [108] entsprechende Daten erhoben, die in Abbildung 5.17a dargestellt sind. Das dort beobachtete Gebiet weist vergleichbare Charakteristika auf, da es sich ebenfalls in der Münchener Innenstadt befindet und direkt an das ausgewählte Testgebiet angrenzt. Nachdem die Ergebnisse der Nutzerstudie mit den Belegungsdaten unter Berücksichtigung der jeweiligen Tageszeiten verrechnet wurden, ergibt sich ein Wert, der die Erfolgswahrscheinlichkeit mit und ohne die Verwendung des Prototypen widerspiegelt, wie in Abbildung 5.17b veranschaulicht. Folglich würden bei gleicher Parkplatzauslastung



(a) Parkplatzbelegung nach [108]



(b) Statistischer Nutzen

Abbildung 5.17: Parkplatzbelegung in der Münchner Innenstadt und statistischer Nutzen des gemeinschaftlichen Parkplatzmanagements

15% (P 2) bzw. 18% (P 3) mehr Parkvorgänge stattfinden und damit zu einer theoretischen Zeitersparnis von 1 Minute 26 Sekunden (P 2) bzw. 2 Minuten 37 Sekunden (P 3) bis zum Finden eines Parkplatzes mit der Verwendung des vorgestellten gemeinschaftlichen Parkplatzmanagement Systems führen. Benutzer können daher mit Hilfe der kollaborativ generierten Parkplatzinformationen schneller einen Parkplatz finden, was sich positiv auf die Akzeptanz und damit auf die Verbreitung und Nutzung der Anwendung auswirkt. Dabei hat eine verstärkte Nutzung des Systems eine entsprechende Erweiterung der Datenbasis zur Folge, wodurch auch die Anzahl der im System vorhandenen Parkplatzinformationen steigt. Im Gegensatz zu den positionsgenauen Parkplatzinformationen, auf der Basis von GPS Koordinaten, kann für eine abstraktere Variante auch eine Zählvariable für die jeweiligen Straßenabschnitte verwaltet werden, so dass den Benutzern geeignete Gebiete anstelle der einzelnen Parkplätze angeboten werden können. Dadurch wäre zwar die Validierung nicht mehr punktuell möglich, aber größere Abweichungen bezüglich der Position, insbesondere in Straßenschluchten, können hierbei vernachlässigt werden.

Insgesamt handelt es sich bei diesem System um eine Maßnahme mit Pull Effekt, bei der durch die Informationen über öffentliche Parkplätze ein Anreiz zur Nutzung auf Grund der effizienteren Parkplatzsuche geschaffen wird. Aus Sicht der Benutzer kann die Anwendung zu den Reiseinformationen gezählt werden, mit denen das schnellere Finden und eine dadurch

kürzere Suchzeit durch das direkte Anfahren eines freien Parkplatzes möglich ist. Dabei ist der positive Effekt der Reduzierung des Parkplatzsuchverkehrs auch für die Administration von Interesse und trägt zur Verringerung des Gesamtverkehrs bei. Somit stellt für diesen Akteur die zentrale Entität ein ergänzendes Instrument im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Verkehrsbeeinussung dar. Zusätzlich kann durch eine entsprechende Entlastung der Infrastruktur auch die Belastung für die Umwelt durch einen besseren Verkehrsfluss reduziert werden. Durch den Einsatz handelsüblicher Smartphones sind zudem die Kosten aus Sicht des Betreibers im Vergleich zur Installation stationärer Sensoren für jeden öffentlichen Parkplatz sehr gering und können vom Benutzer unabhängig vom Fahrzeug verwendet werden.

5.3 Bedarfsorientierte Tür-zu-Tür Transportsysteme in urbanen Regionen

In diesem Abschnitt werden zunächst unterschiedliche Verfahren für den Einsatz des Prinzips der dynamischen Transferknoten (DTN) für den kooperativen Transport vorgestellt. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Möglichkeiten zur Aufteilung der Optimierungsphase (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), wobei zwischen einem zentralen, einem unterstützenden und einem vollständig verteilten Verfahren unterschieden wird. Im Anschluss an die Beschreibung und qualitative Bewertung der Verfahren wird eine Simulationsumgebung vorgestellt, mit der diese evaluiert werden können. In den darauf folgenden Abschnitten werden unterschiedliche Einsatzgebiete für die Verwendung dynamischer Transferknoten im Rahmen quantitativer Analysen untersucht und die jeweiligen Ergebnisse präsentiert.

5.3.1 Verfahren des kooperativen Ansatzes

Die im Folgenden aufgezeigten Verfahren ermöglichen eine Verteilung der notwendigen Aufgaben zur Realisierung des kooperativen Transports. Zu diesen Aufgaben zählt sowohl die Registrierung und Verwaltung von neuen Transportaufträgen als auch die Planung des eigentlichen Transports, wobei die Umsetzung und Durchführung basierend auf geeigneten Technologien zur Kommunikation (vgl. Abschnitt 4.1.1) erfolgt, die in den Fahrzeugen, beispielsweise in Form einer Onboard Unit, verfügbar sind. Im Vordergrund steht der Transport von Personen durch einen entsprechenden Dienstleister oder Mobilitätsanbieter, weshalb zur Erläuterung der Verfahren von Fahrgästen die Rede ist, die von einer Abholposition zu einer Ablieferungsposition befördert werden sollen. Denkbar wäre auch der Transport von Waren, wobei dieser Fall bei einem der später behandelten Einsatzmöglichkeiten in Abschnitt 5.3.3 behandelt wird. Neben der Kommunikation, wird insbesondere bei dem unterstützenden und dem verteilten Verfahren zusätzlich verfügbare Rechenleistung im Fahrzeug vorausgesetzt. Diese wird benötigt, um einerseits das Tourenplanungsproblem unter Verwendung der DTNs zu lösen und andererseits um zusätzliche Aufgaben, wie die Bereitstellung von Informationen für die aktiven Fahrgäste oder die Umsetzung eines drahtlosen Bezahlsystems, zu übernehmen. Im Vordergrund steht allerdings die Tourenplanung, die mit Hilfe der Verfahren durchgeführt werden kann.

Bedarfsorientierte Transportsysteme orientieren sich an der aktuellen Nachfrage und

berücksichtigen gegebenenfalls die individuellen Abhol- und Ablieferungspositionen. Reale Systeme konzentrieren sich in der Regel auf spezielle Einsatzszenarien, wie beispielsweise eine einfache Verbindung von einem Parkhaus zum Flughafenterminal und verwenden hierfür feste Routen bei denen die jeweiligen Positionen durch Haltestellen festgelegt sind. Eine weitaus größere Herausforderung stellen bedarfsorientierte Systeme dar, mit denen ein tatsächlicher Tür-zu-Tür Transport umgesetzt wird. Die besondere Schwierigkeit entsprechender Ansätze liegt in der Skalierbarkeit, um eine optimale Tour für eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen zur Beförderung der Personen zu berechnen. Dabei können unterschiedliche Kriterien berücksichtigt werden, wobei mit deren Anzahl auch die Komplexität zunimmt. Damit steigt auch die Schwierigkeit, da neben den individuellen Abhol- und Ablieferungspositionen zusätzlich die Kapazität der Fahrzeuge, Zeitfenster oder andere Einschränkungen berücksichtigt werden müssen. Bisher befassten sich entsprechende Systeme vorrangig mit dem Transport von Personen mit besonderen Bedürfnissen, wobei in diesen Fällen die Transportaufträge im Vorfeld bekannt sind und dadurch deutlich mehr Zeit für die Planung einer optimalen Tour zur Verfügung steht. Beim Tür-zu-Tür Personentransport in Verbindung mit dynamischen Anfragen spielt neben der Zeit zur Berechnung einer optimalen Tour auch die Reaktionszeit bis zur Abholung sowie die Fahrzeit der Fahrgäste eine entscheidende Rolle für die praktische Umsetzung. In der Regel berücksichtigen bisherige Ansätze hierbei lediglich einen geringen Anteil dynamischer Anfragen von unter 30%. Bei statischen, aber insbesondere auch bei dynamischen, Anfragen nimmt die Skalierbarkeit mit steigender Nachfrage ab, so dass nur eine beschränkte Anzahl von Transportaufträgen mit akzeptablen Ergebnissen durchgeführt werden kann. Je mehr dynamische Anfragen eintreffen desto schwieriger ist es, eine im Verhältnis zur Berechnungszeit optimale Tour unter Berücksichtigung der jeweiligen Kriterien zu berechnen. Die im Folgenden vorgestellten Verfahren, sind für den Einsatz in großen Metropolen gedacht und als Mobilitätsalternative sowohl zum öffentlichen Verkehr als auch zum Individualverkehr zu verstehen. In diesem Zusammenhang ist mit zahlreichen Anfragen zu rechnen, die zudem dynamisch auftreten und keine Tourenplanung im Vorfeld erlauben. Auf diese Weise wird die Spontaneität von Mobilitätsbedürfnissen sowie deren exible Umsetzung im Rahmen des bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Personentransports berücksichtigt. Im Anschluss an die informelle Beschreibung der Verfahren folgt eine qualitative Bewertung, bei der neben der Skalierbarkeit und der Kontrolle auch auf sinnvolle Kombinationen von Verfahren und Kommunikationstechnologien eingegangen wird. Im weiteren Verlauf wird die entwickelte Simulationsumgebung vorgestellt und die technische Umsetzung der einzelnen Verfahren erläutert. Abschließend werden quantitative Analysen anhand unterschiedlicher Einsatzmöglichkeiten durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse präsentiert.

5.3.1.1 Zentrales Verfahren

Bei dem zentralen Verfahren, welches in Abbildung 5.18 dargestellt ist, liegt die gesamte Arbeitslast auf der Seite des Servers. Die Fahrgäste melden bei einer zentralen Entität das Transportbedürfnis an, das aus der Abholposition und der Ablieferungsposition in Form von GPS Koordinaten oder der entsprechenden Adresse sowie der aktuellen Uhrzeit besteht.

Zusätzlich melden die Fahrzeuge der Zentrale die aktuelle Position sowie Informationen über die aktuellen Fahrgäste in regelmäßigen Abständen, um eine Planung auf aktuellen Daten zu gewährleisten. Sobald sich ein neuer Fahrgast registriert, wird dieser in einer globalen

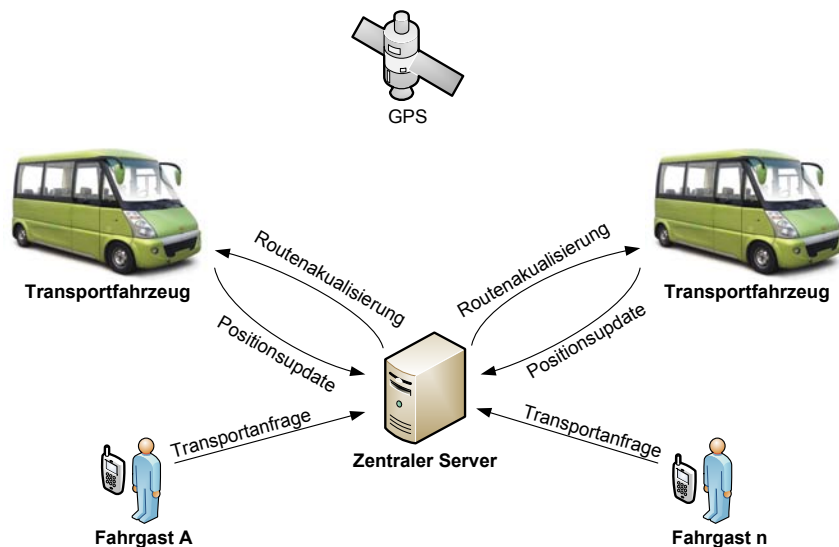


Abbildung 5.18: Systemüberblick des zentralen Verfahrens

Reservierungsliste verwaltet. Der Server versucht die in der globalen Reservierungsliste vorhandenen Fahrgäste anhand unterschiedlicher Parameter, wie der Entfernung zwischen Fahrzeug und Fahrgast, der Kapazität des Fahrzeugs oder einzuhaltender Zeitfenster, geeigneten Fahrzeugen zuzuordnen. Ist eine optimale Fahrgast zu Fahrzeug Aufteilung gefunden, erfolgt die Routenplanung für das betroffene Fahrzeug und das Ergebnis in Form einer Route wird zusammen mit Informationen über den neuen Fahrgast an das Fahrzeug übermittelt. Das jeweilige Fahrzeug folgt der Route und holt dabei an den entsprechenden Positionen Fahrgäste ab oder lässt diese aussteigen. Mit dem Fokus auf die hohe Dynamik des Systems wird beim zentralen Verfahren die Ablieferungsposition bei der Zuordnung zunächst nicht berücksichtigt. Dafür wird, je nach Kooperationsmechanismus (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), entweder direkt nach der Zuordnung im ereignisbasierten Fall oder in regelmäßigen Abständen beim periodischen Mechanismus das Kooperations- bzw. Verbesserungsverfahren initiiert. Bei der zentralen Variante stehen hierfür die Informationen sämtlicher Fahrzeuge unabhängig von deren aktuellen Positionen zur Verfügung, so dass auch weiter voneinander entfernte Fahrzeuge in diesem Prozess berücksichtigt werden können. Sofern eine Kooperation auf Basis einer Bewertung sinnvoll erscheint, wird der berechnete DTN zusammen mit der neuen Fahrgastaufteilung an die Fahrzeuge übermittelt. Anhand dieser Informationen ist dem Fahrzeug sowohl die Austauschposition bekannt als auch welche der aktiven Fahrgäste am Transfer beteiligt sind und kann diese entsprechend informieren. Für den Austausch der nötigen Informationen, sowohl für die Aktualisierung der Fahrzeugposition als auch für die Übermittlung von Routeninformationen, die zusätzlich Angaben über neue Fahrgäste und gegebenenfalls die DTN Position enthalten, kann beispielsweise eine der infrastrukturbasierten Kommunikationstechnologien (vgl. Abschnitt 4.1.1.1) verwendet

werden. Sofern eine ausreichende Infrastruktur für die Car2I bzw. Car2X Kommunikation vorhanden ist, können die notwendigen Daten auch auf diesem Wege ausgetauscht werden. Potenziell würden sich Bündel- oder Betriebsfunksysteme eignen, bei denen allerdings nur eine verhältnismäßig geringe Bandbreite und relativ lange Latenzzeiten in Kauf genommen werden müssen. Allerdings sind entsprechende Technologien bei zahlreichen Verkehrsbetrieben im produktiven Einsatz und ermöglichen eine sichere Übertragung mit hoher Zuverlässigkeit über eine bereits vorhandene Kommunikationsinfrastruktur.

5.3.1.2 Unterstützendes Verfahren

Der unterstützende Ansatz basiert auf einer Aufteilung der Arbeitslast zwischen der zentralen Entität und den Fahrzeugen. Die Registrierung der Fahrgäste findet, wie Abbildung 5.19 zeigt, weiterhin über die zentrale Entität statt. Allerdings wird bezüglich der Zuordnung von den Fahrgästen zu den Fahrzeugen, dem Fahrzeug lediglich eine Vorauswahl geeigneter Kandidaten zur Verfügung gestellt. Abhängig von der Konfiguration der Gewichtungen können hierbei unterschiedliche Prioritäten für die zu berücksichtigenden Kriterien festgelegt werden, die sich nicht mit denen des Fahrzeugs decken müssen. Somit entscheidet das Fahrzeug im Anschluss

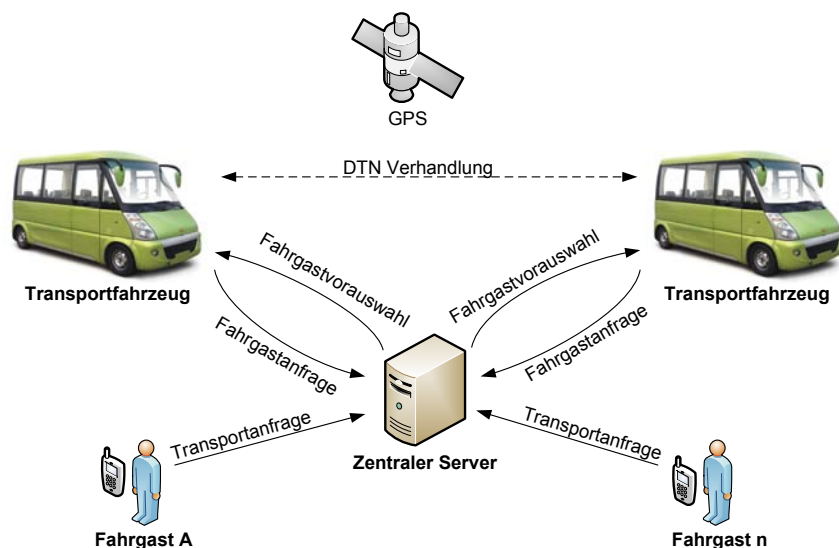


Abbildung 5.19: Systemüberblick des unterstützenden Verfahrens

autonom, welcher oder welche der Kandidaten bei der Routenplanung berücksichtigt werden sowie zu welchem Zeitpunkt die Abholung erfolgt. Im Vergleich zum zentralen Verfahren wird die Tourenplanung vom Fahrzeug basierend auf den lokal verfügbaren Informationen selbst durchgeführt. Dadurch wird der notwendige Rechenaufwand auf die Fahrzeuge verteilt, die somit jeweils eine Tour für eine begrenzte Anzahl von Fahrgästen bzw. Reservierungen berechnen müssen. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten der Rechenleistung im Fahrzeug, beispielsweise in Form einer geeigneten Onboard Unit oder eines Fahrzeug PCs, verhältnismäßig hoch sind. Zusätzlich werden neben der Navigationsfunktionalität zur Routenplanung auch Informationen über Möglichkeiten regelkonformer Transferpunkte benötigt, um entsprechende Positionen zu bestimmen. Bezüglich der Optimierungsphase werden geeignete Ko-

operationspartner nicht mehr zentral bestimmt, sondern die Fahrzeuge senden Anfragen, je nach eingesetzter Kommunikationstechnologie, entweder in der unmittelbaren Umgebung oder innerhalb eines bestimmten Gebietes. Im Folgenden wird hierfür der Begriff Kooperationsreichweite verwendet. Befinden sich zwei Fahrzeuge in Kooperationsreichweite, tauschen sie die zur Optimierung notwendigen Informationen aus und eines der Fahrzeuge entscheidet, anstelle der zentralen Entität, ob dies zu einer Verbesserung der initialen Aufteilung führt. In diesem Zusammenhang wird die DTN Verhandlung verteilt ausgeführt, wie in Abbildung 5.20 dargestellt. Im

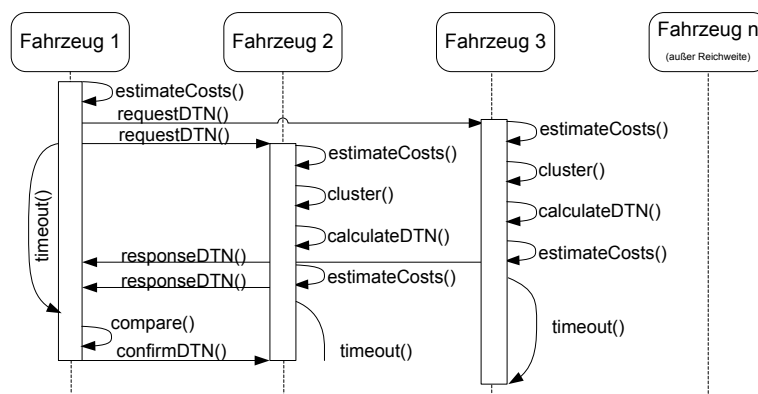


Abbildung 5.20: Ablauf einer verteilten DTN Verhandlung

Gegensatz zur beschriebenen Funktionsweise in Abschnitt 4.3.3.2, werden in diesem Beispiel die Kosten der aktuellen Fahrgäste vom anfragenden Fahrzeug 1 geschätzt (`estimateCosts()`). Zusammen mit der eigenen Position wird im Anschluss die entsprechende Fahrgastliste in Form einer DTN Anfrage an die Fahrzeuge in Kooperationsreichweite gesendet (`requestDTN()`). Die Fahrzeuge 2 bzw. 3, die sich in einer entsprechenden Entfernung befinden, erhalten die Anfrage und schätzen darauf hin die eigenen Kosten. Im Anschluss werden die von dem anfragenden Fahrzeug übermittelte zusammen mit der eigenen Fahrgastliste dem Clustering Prozess (`cluster()`) übergeben und im Falle einer neuen Fahrgastverteilung ein geeigneter DTN bestimmt (`calculateDTN()`). Zu diesem Zweck kann ein angepasstes Navigationsgerät verwendet werden, bei dem die notwendigen Informationen berücksichtigt werden. Basierend auf der neuen Fahrgastaufteilung werden nun die entsprechenden Kosten geschätzt und sofern sich eine Einsparung ergibt wird das Ergebnis zusammen mit den Koordinaten des DTNs sowie der neuen Fahrgastaufteilung als Antwort an das anfragende Fahrzeug übermittelt. Andernfalls wird von einer Antwort abgesehen. Da sich mehrere Fahrzeuge in Kooperationsreichweite des anfragenden Fahrzeugs befinden können, wird eine bestimmte Zeit auf eingehende Antworten gewartet (`timeout()`) bevor diese, anhand der geschätzten Kosteneinsparung verglichen werden (`compare()`). Abschließend wird eine Bestätigung an das Fahrzeug gesendet, bei dem die Einsparung am größten ist (`confirmDTN()`).

5.3.1.3 Verteiltes Verfahren

Im verteilten Ansatz, der in Abbildung 5.21 dargestellt ist, sind die Fahrzeuge für die Registrierung und Verwaltung von Transportanfragen und die Initiierung der Kooperation zuständig. Die Reservierungen werden dabei mit Hilfe eines Peer-to-Peer Ansatzes (vgl.

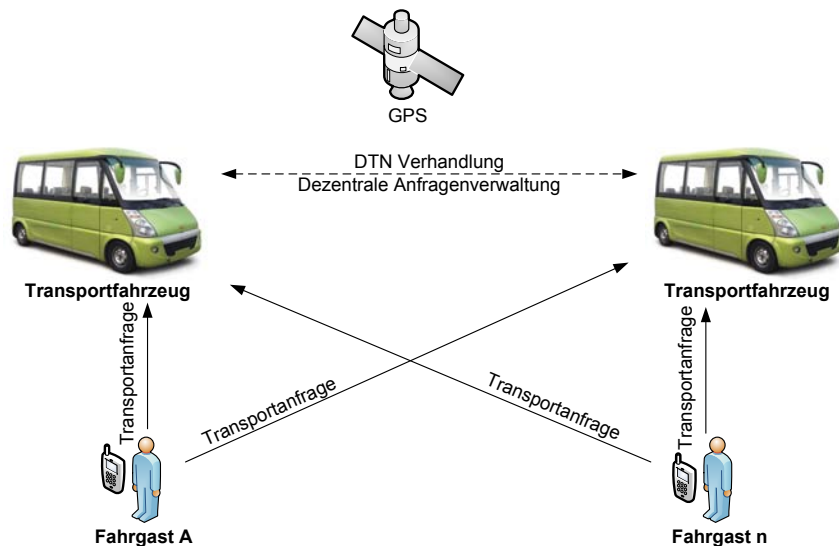


Abbildung 5.21: Systemüberblick des verteilten Verfahrens

Abschnitt 4.1.2.2) verwaltet und die Kooperation erfolgt, wie bereits beim unterstützenden Ansatz, ebenfalls dezentral. Fahrgäste können für eine direkte Kommunikation mit den Fahrzeugen Endgeräte verwenden, die in der Lage sind Informationen über den Standard 802.11p (vgl. Kapitel 4.1.1.2) auszutauschen. Ein hierfür geeignetes Gerät ist beispielsweise das Erweiterungsmodul der Firma OKI [231]. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung der sogenannten Direct-to-Direct Kommunikation über den LTE Standard (vgl. Kapitel 4.1.1.1), wobei auch die Fahrzeuge über entsprechende Kommunikationsmodule verfügen müssen. Die Entfernung, über die eine Transportanfrage eines Fahrgastes gesendet und von einem Fahrzeug empfangen werden kann, wird im Folgenden mit Kommunikationsreichweite bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Verbreitung entsprechender Transportanfragen besteht die Möglichkeit, dass die Kommunikationsreichweite im Laufe der Wartezeit zunimmt, indem nach geeigneten Zeitintervallen die Anzahl der Hops (englisch: Time to Live, TTL) erhöht oder der Suchradius unter Verwendung des räumlich beschränkten Multicasts vergrößert wird. Sobald sich ein Fahrzeug in Kommunikationsreichweite befindet, wird der Fahrgast zum einen in die lokale Reservierungsliste aufgenommen und zum anderen erfolgt, unter Verwendung eines Peer-to-Peer Ansatzes, die Weiterleitung und verteilte Verwaltung der Fahrgastinformationen. Das Fahrzeug, dessen nächstes Ziel die Position eines wartenden Fahrgastes ist, informiert diesen zunächst über die Abholung, wodurch der Fahrgast die periodischen Transportanfragen einstellt. Ist der Fahrgast zugestiegen, wird der Status des jeweiligen Fahrgastes in der verteilt verwalteten Reservierungsliste aktualisiert, wodurch andere Fahrzeuge, in deren Reservierungsliste sich der Fahrgast ebenfalls befinden kann, die Reservierung entfernen. Optional könnte die Peer-to-Peer Registrierung und Verwaltung unter Verwendung einer infrastrukturbasierten Kommunikationstechnologie flächendeckend erfolgen, um Inkonsistenzen auf Grund der lokalen Informationsverteilung vorzubeugen. Bezüglich der dezentralen Verwaltung von Transportanfragen besteht außerdem die Möglichkeit anhand der Abholpositionen eine räumliche Unterteilung vorzunehmen, so dass Anfragen lediglich

innerhalb eines begrenzten Gebietes von einem bestimmten Fahrzeug verwaltet werden müssen. Entsprechende Ansätze zur dezentralen Verwaltung lokal relevanter Daten sind unter anderem in [274] zu finden. Neben der Fahrgast zu Fahrzeug Kommunikation kann die Kooperation zwischen den Fahrzeugen auch mit Hilfe der C2C Kommunikation realisiert werden, um eine Umsetzung des Prinzips der dynamischen Transferknoten zu gewährleisten. Bei dem Prozess der Kooperation und der entsprechenden Routenplanung wird analog zum unterstützenden Ansatz verfahren. Auf diese Weise ist das verteilte Verfahren, im Gegensatz zum unterstützenden, nicht mehr auf eine Vorauswahl an potenziellen Fahrgästen angewiesen. Allerdings ist dadurch auch keine beeinträchtigende Kontrolle einer zentralen Instanz mehr möglich. Dadurch kann, basierend auf einer geeigneten Vorauswahl der Fahrgäste und der globalen Wissensbasis, ein Fahrzeug beispielsweise in Richtung eines bestimmten Gebietes dirigiert werden, um dortige Anfragen besser berücksichtigen zu können.

5.3.1.4 Qualitative Bewertung der Verfahren

Bei dem vorliegenden Problem zur Fahrgastbeförderung handelt es sich um eine Unterklasse des TSP (vgl. Kapitel 4.3.2). Basierend auf dem Beweis der NP Vollständigkeit des Hamiltonkreisproblems [125], wobei NP für nichtdeterministische Polynomialzeit steht, lässt sich die NP Äquivalenz des TSP und dadurch die theoretische Begründung für die schwere Lösbarkeit des Problems in der Praxis ableiten. Insbesondere bei großen Probleminstanzen hat die Komplexität dieser Problemklassen Auswirkungen auf die Skalierbarkeit.

Im Hinblick auf die Skalierbarkeit wird durch die Dezentralisierung des globalen Tourenplanungsproblems eine Aufteilung der Gesamtproblems in kleinere Teilprobleme erreicht. Durch die kleineren Teilprobleme, deren Größe durch die Anzahl der aktiven Fahrgäste und den entsprechenden Reservierungen begrenzt ist, muss lediglich eine Lösung für wesentlich kleinerer Probleminstanzen berechnet werden. Hierbei wird angenommen, dass die Kombination optimaler Lösungen lokaler Problemstellungen zu einer optimalen globalen Lösung führt. Im Gegensatz zum zentralen Verfahren, bei dem das globale Planungsproblem unter Verwendung des Prinzips der dynamischen Transferknoten gelöst wird, kann beim unterstützenden Verfahren die Optimierungsphase auf die ausführenden Entitäten in Form von Fahrzeugen verteilt werden. Dabei wird das Tourenplanungsproblem von den Fahrzeugen gelöst, wobei die zentrale Entität eine Vorauswahl potenzieller und geeigneter Fahrgäste in Form von Reservierungen basierend auf den global zur Verfügung stehenden Informationen trifft. Anhand dieser Informationen können unterschiedliche Optimierungskriterien, wie beispielsweise die Fahrzeugauslastung oder die Reduzierung der Wartezeiten sämtlicher Fahrgäste, besser bzw. abschließend berücksichtigt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Routen der Fahrzeuge zu beeinflussen, um beispielsweise eine bessere Verteilung der Fahrzeuge und damit eine kürzere Reaktionszeit zur Abholung in schwach frequentierten Gebieten zu gewährleisten. Beim unterstützenden Ansatz ergibt sich wegen der Aufteilung der Problemstellung eine bessere Skalierbarkeit bezüglich der Tourenplanung, dafür wird aber auch die Einschränkung und Möglichkeit zur Kontrolle einer zentralen Instanz verringert, da diese nicht am Planungsprozess beteiligt ist. Allerdings besteht die Möglichkeit der indirekten Beeinflussung durch eine entsprechende Vorauswahl potenzieller Fahrgäste. Beim verteilten Verfahren wird neben der Tourenplanung die Verwaltung

der Transportanfragen und damit die initiale Fahrgast zu Fahrzeug Zuordnung dezentralisiert. Durch die vollständige Auslagerung der Aufgaben kann auf eine zentrale Komponente verzichtet werden. Dies führt abhängig von der Anzahl der beteiligten Fahrzeuge und der lokal verfügbaren Rechenleistung zur einer weiteren Verbesserung im Hinblick auf die Skalierbarkeit. Durch den Wegfall der zentralen Instanz ist jedoch auch keine Möglichkeit der indirekten Einsparung und Kontrolle gegeben, da sämtliche Entscheidungen lediglich basierend auf den lokal verfügbaren Informationen von den Fahrzeugen getroffen werden. Außerdem entfällt mit dieser Instanz auch die Möglichkeit der Registrierung der Transportanfragen an einer zentralen Stelle und könnte in der Praxis zu Akzeptanzproblemen führen. Als Rückfalllösung sollte daher zusätzlich eine alternative Kommunikationstechnologie eingesetzt werden, die unabhängig von der Distanz eine Verbindung zu einem Fahrzeug ermöglicht.

Für jedes der drei Verfahren kann zum Zweck der Kooperation entweder ein ereignisbasierter oder periodischer Kooperationsmechanismus genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.3.3.2). Im Zusammenhang mit der Skalierbarkeit ist die Anzahl der Berechnungen relevant, die bei der Optimierungsphase unter anderem für die Kostenschätzung durchgeführt werden müssen. Diese hängt dabei im Wesentlichen von der Anzahl potenzieller Kooperationspartner ab. Bei der Verwendung des Prinzips der dynamischen Transferknoten ist jedoch ein hoher Anteil an Kooperationen für einen effizienteren Transport wünschenswert. Eine eher untergeordnete Rolle spielen in diesem Zusammenhang die Nachrichten, die beim unterstützenden und verteilten Verfahren zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden. Unter dem Optimierungsgrad ist im Hinblick auf die Kooperationsmechanismen vorrangig die Ausnutzung der Kooperationsmöglichkeiten entscheidend, deren Anzahl abhängig von der Kooperationsreichweite und somit von der eingesetzten Kommunikationstechnologie ist. Je größer die Kooperationsreichweite ist, desto geringer ist die Skalierbarkeit, da die Berechnungen mit steigender Anzahl von möglichen Kooperationspartnern ebenfalls zunehmen. Allerdings steigt mit einer größeren Kooperationsreichweite auch die Wahrscheinlichkeit einen geeigneten Kooperationspartner zu finden, wodurch eine Optimierung erreicht wird. Hierbei ist zu beachten, dass die erreichbare Optimierung in Form einer Kostensenkung durch die Kooperation zwischen Fahrzeugen mit steigender Distanz abnimmt, da die beteiligten Fahrzeuge gegebenenfalls eine längere Strecke zum Transferknoten zurücklegen müssen. Eine Begrenzung der Kooperationsreichweite erscheint daher insbesondere bei der Verwendung des zentralen Verfahrens oder bei der Nutzung infrastrukturbasierter zellulärer Netze in Kombination mit dem ereignisbasierten Mechanismus sinnvoll. Dennoch sollte die Reichweite groß genug gewählt werden, um eine entsprechende Optimierung auch bei einer geringen Fahrzeugdichte zu erzielen. Im Gegensatz dazu reicht beim periodischen Mechanismus auch eine geringere Kooperationsreichweite aus, da hierbei die laufenden Positionsveränderungen der Fahrzeuge ausgenutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit einer Kooperation zu erhöhen. Im Hinblick auf die Mechanismen lässt sich festhalten, dass unabhängig vom Verfahren die Verwendung des ereignisbasierten Mechanismus bei gleicher Reichweite weniger Berechnungen zur Folge hat und daher besser skaliert als der periodische Mechanismus. Allerdings ist der Optimierungsgrad durch die Verwendung periodischen Mechanismus höher, da durch die Bewegung der Fahrzeuge ein größeres Gebiet zum Auffinden möglicher Kooperationspartner abgedeckt wird. Dem kann allerdings durch eine Erhöhung der

Reichweite bei der ereignisbasierten Variante entgegengewirkt werden. In Abbildung 5.22 sind sowohl die Verfahren bezüglich der Skalierbarkeit und der Kontrolle in Form der Möglichkeit zur Einussnahme einer zentralen Instanz als auch der Einuss der Kooperationsmechanismen aufgezeigt. Bei den Mechanismen bezieht sich die Beurteilung auf die Skalierbarkeit in Relation zum möglichen Grad der Optimierung unter Verwendung einer äquivalenten Kooperationsreichweite. Da die Reichweite und damit der Optimierungsgrad der Mechanismen maßgeblich

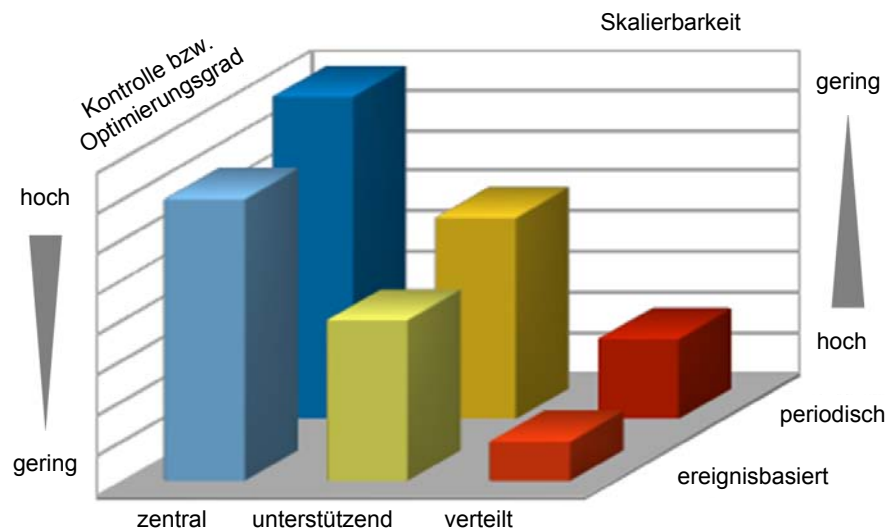


Abbildung 5.22: Verfahren und Mechanismen im Vergleich zu Kontrolle/Optimierungsgrad und Skalierbarkeit

von der verwendeten Kommunikationstechnologie abhängen, werden im Folgenden sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten erläutert. Beim zentralen Verfahren findet die gesamte Kommunikation über eine zentrale Entität statt. Daher ist in diesem Fall, unabhängig vom verwendeten Mechanismus und dem Zweck der Kommunikation, der Einsatz einer infrastrukturbasierten zellularen Technologie geeignet. Im Zusammenhang mit dem Zweck kann zwischen drei Fällen unterschieden werden:

1. Fahrgastregistrierung: Die Möglichkeit eines Fahrgastes den Transportbedarf anzumelden.
2. Server zu Fahrzeug: Die Kommunikation erfolgt dabei in beide Richtungen und ermöglicht die Zuweisung von Fahrgästen und Routeninformationen einerseits und die Positionsaktualisierungen andererseits.
3. Fahrzeug zu Fahrzeug: Hierbei tauschen die Fahrzeuge direkt oder indirekt Informationen aus, die für die Optimierungsphase verwendet werden.

Auf Grund der hohen Verfügbarkeit und Funktionalität von Smartphones bietet sich für die Fahrgastregistrierung die Verwendung von entsprechenden Mobilfunktechnologien an. Für die Kommunikation bezüglich der Punkte 2 und 3 kann, je nach Fahrzeugausstattung und dem notwendigen Abdeckungsgebiet, auch die C2X bzw. C2I Kommunikationstechnologie verwendet werden. Weitere Möglichkeiten zur Kommunikation stellen hierbei die im öffentlichen Nahverkehr etablierten Bündelfunksysteme dar, wie beispielsweise der in Abschnitt 4.1.1.1 vorgestellte TETRA Standard. Für das unterstützende Verfahren ist ebenfalls der Einsatz

von Smartphones zur Registrierung der Benutzer sinnvoll. Der Austausch von Informationen für die Optimierungsphase kann hierbei direkt mit Hilfe der C2C Kommunikation erfolgen, wobei sich diese Technologie insbesondere für den periodischen Mechanismus anbietet, bei dem die Reichweite bzw. die Größe des Kooperationsgebietes eine untergeordnete Rolle spielt. Für den ereignisbasierten Mechanismus und für die Kommunikation mit dem Server sollte auf Grund der höheren Abdeckung entweder auf eine Mobilfunktechnologie oder ein etabliertes Bündel- bzw. Betriebsfunksystem zurückgegriffen werden. Allerdings können hierfür, wie auch schon beim zentralen Ansatz, die infrastrukturbasierte C2X bzw. C2I Technologien zum Einsatz kommen. Das verteilte Verfahren nutzt keine zentrale Komponente für die Registrierung oder initiale Zuordnung von Fahrgästen zu Fahrzeugen. In diesem Fall muss die Möglichkeit bestehen, dass potenzielle Fahrgäste direkt mit den Fahrzeugen kommunizieren können. Dies kann beispielsweise mit der zukünftigen Integration geeigneter Funkmodule in Smartphones umgesetzt werden. Alternativ könnte als Rückfalllösung auch eine zentrale Komponente mit minimaler Funktionalität bereitgestellt werden, die einen Knoten der P2P Infrastruktur repräsentiert. Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen kann entweder direkt über die C2C Kommunikation erfolgen oder ebenfalls mit einem Bündelfunk- bzw. Betriebsfunksystem umgesetzt werden. Letzteres bietet sich dabei neben anderen infrastrukturbasierten Netzwerken für die Realisierung unter Verwendung des ereignisbasierten Mechanismus an, da hierbei eine höhere Abdeckung des Kooperationsgebietes erreicht wird.

Als Ergebnis der qualitativen Bewertung lässt sich festhalten, dass ein System für den Tür-zu-Tür Transport eine verhältnismäßig hohe Dienstqualität bietet und dadurch die Attraktivität gesteigert werden kann, wobei das zentrale Verfahren für den Einsatz kleinerer Instanzen geeignet ist. Mit Hilfe von Cloud Diensten besteht allerdings in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, basierend auf der dynamischen und hohen Rechenkapazität, die Skalierbarkeit zu verbessern. Allerdings ist hierbei auch mit den größten Kosten bezüglich Installation und Wartung zu rechnen. Dennoch bietet das zentrale Verfahren anhand der global zur Verfügung stehenden Informationen die Möglichkeit der größten Beeinflussung mit Hilfe der Fahrgast zu Fahrzeug Zuordnung sowie einer idealen Fahrzeugverteilung auf das entsprechende Gebiet mit Hilfe der auszuführenden Routen- bzw. Tourenpläne. Dadurch kann eine hohe Verfügbarkeit, insbesondere bei einem großen Gebiet und bei geringer Fahrzeugdichte, erreicht werden. Im Vergleich dazu fallen die laufenden Kosten beim unterstützenden Verfahren entsprechend geringer aus, wobei zu beachten ist, dass die notwendige Rechenleistung im Fahrzeug verhältnismäßig teuer ist. Durch die Verteilung der Arbeitslast sinkt auch die Möglichkeit zur Beeinflussung, da die Routen- bzw. Tourenplanung von den Fahrzeugen selbst übernommen wird. Durch die Aufteilung ist allerdings auch eine bessere Skalierbarkeit zu erwarten. Beim verteilten Verfahren kann auf eine zentrale Komponente vollständig verzichtet werden, wofür allerdings der Einsatz entsprechender Kommunikationstechnologien für die Registrierung der Benutzer notwendig ist. Da sowohl die Verwaltung der Fahrgäste als auch die Routenplanung von den Fahrzeugen übernommen wird, sind die zu erwartenden laufenden Kosten bei diesem Verfahren am geringsten und es ermöglicht eine verhältnismäßig einfache Integration zusätzlicher Fahrzeuge. Dabei ist die Skalierbarkeit des Systems von der Anzahl der Fahrzeuge abhängig. Steigt die Benutzerzahl ist auch der Einsatz mehrerer Fahrzeuge

sinnvoll, wodurch, vergleichbar mit dem Peer to Peer Modell (vgl. Abschnitt 4.1.2.2), die Rechenleistung des Gesamtsystems und damit die Skalierbarkeit zunimmt. Problematisch ist hierbei die dezentrale Fahrgastverwaltung, weshalb bei der praktischen Umsetzung eine geeignete Rückfalllösung in Betracht gezogen werden sollte. Die weitergehenden quantitativen Analysen der erläuterten Verfahren werden mit Hilfe von Simulationen umgesetzt. Hierfür wurde eine eigene, geeignete Simulationsumgebung entworfen und implementiert, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird. Neben der verwendeten Datenbasis und Funktionalität der Umgebung werden im Anschluss die technischen Umsetzungen der einzelnen Verfahren vorgestellt, die bei der Evaluierung verwendet werden.

5.3.2 Simulationsumgebung für den bedarfsorientierten Transport

Zur genaueren Untersuchung der beschriebenen Verfahren wird eine Simulationsumgebung verwendet, mit der das Prinzip der dynamischen Transferknoten anhand unterschiedlicher Szenarien evaluiert werden kann. Dabei können die einzelnen Verfahren und die Mechanismen zur Optimierung basierend auf realistischen Verkehrs- bzw. Straßennetzen und für unterschiedliche Fahrgastinstanzen bzw. Problemgrößen analysiert werden. Bestehende Simulationsumgebungen, wie das Verkehr in Städten Simulationsmodell (PTV VISSIM) [241], Simulation of Urban Mobility (SUMO) [13] oder Aimsun [177] konzentrieren sich hauptsächlich auf die Verkehrsflusssteuerung unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzeug- oder Fahrermodelle sowie Mechanismen zur variablen Wegewahl. Teilweise erlauben entsprechende Umgebungen auch die Modellierung multimodaler Verkehrsnetze unter Verwendung geeigneter Bedarfsmodelle bezüglich Start- und Zielpunkten. Diese Verkehrssimulationen können dabei für die allgemeine Verkehrsplanung, die Signalsteuerung, die Planung öffentlicher Verkehrsnetze oder die Verkehrsprognose verwendet werden. Zudem existieren einige auf die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation spezialisierte Umgebungen, wie TraNS [270], welches SUMO und den Network Simulator 2 (NS2) [228] kombiniert oder JiST mit der Erweiterung SWANS [216] für die drahtlose Kommunikation, die entsprechende Signalausbreitungsmodelle anbieten. Allerdings eignen sich die genannten Umgebungen nur bedingt für die Analyse der vorgestellten Verfahren im Zusammenhang mit dem dynamischen und bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transport und würden umfangreiche und aufwendige Anpassungen erfordern, die teilweise auf Grund der Lizenzen und geschlossenen Quellen zudem nicht möglich gewesen wären. Daher wurde für den speziellen Anwendungsfall eine geeignete Simulationsumgebung entwickelt, wobei in den folgenden Abschnitten zunächst auf die verwendete Datenbasis eingegangen wird, bevor die Funktionalität und die Konfigurationsmöglichkeiten vorgestellt werden.

5.3.2.1 Datenbasis

Als Grundlage der entwickelten Simulationsumgebung wird auf die frei verfügbaren und lizenzfrei nutzbaren OSM Daten zurückgegriffen, die lokal in einer Datenbank abgelegt und gegebenenfalls angepasst werden können. Die georeferenzierten Daten bieten insbesondere in städtischen Regionen zahlreiche Detailinformationen, die auch schon in den vorherigen Abschnitten zur Umsetzung der entsprechenden Prototypen genutzt wurden. Im Vordergrund stehen hierbei Informationen über das Straßennetz, bei dem neben den unterschiedlichen

Straßentypen, wie unter anderem Wohn-, Neben-, Hauptstraßen und Autobahnen auch die entsprechenden Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie die Breite oder die Durchfahrtshöhe enthalten sind. Unter Berücksichtigung von Abbiegerestriktionen und Einbahnstraßen lassen sich entweder basierend auf den jeweiligen Distanzen oder der erlaubten Geschwindigkeit die kürzesten bzw. schnellsten Routen berechnen. Diese Angaben sorgen für eine realistische Bewegung auf real existierenden Verkehrsnetzen, wobei als Basis für die Routenberechnungen pgRouting [238] verwendet wird. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung für eine PostgreSQL/PostGIS Datenbank, die eine individuelle Anpassung der vorhandenen Routingfunktionalitäten ermöglicht. Das Ergebnis einer solchen Berechnung sind einzelne Wegsegmente, die basierend auf einer zeitdiskreten Simulation von den Fahrzeugen, abhängig von Fahrzeuggröße und -gewicht, befahren werden. Hierzu wird in jedem Simulationsschritt die zurückgelegte Distanz anhand der aktuellen Geschwindigkeit bestimmt und erlaubt dadurch die Simulation von Fahrzeugbewegungen. Mit Hilfe entsprechender Methoden kann dabei die Basisgeschwindigkeit, beispielsweise abhängig vom allgemeinen Verkehrsaufkommen, verändert werden und zu realitätsnahen Fahrzeugbewegungen beitragen. Im Zusammenhang mit den dynamischen Transferknoten lassen sich mögliche Positionen anhand der Informationen über den Straßentyp bestimmen. Hierbei besteht beispielsweise auch die Möglichkeit, einzelne Wegsegmente oder ganze Gebiete, abhängig von bestehenden Verkehrsregeln, als mögliche Transferpunkte auszuschließen oder explizit zu definieren. Somit lassen sich Transferpunkte unter anderem auf Parkplätze oder spezielle Umschlagplätze beschränken, wobei im letzteren Fall das Verladen von Waren und der notwendige Platzbedarf im Vordergrund steht. Liegt ein berechneter Transferknoten auf einem ausgeschlossenen Wegsegment kann basierend auf den georeferenzierten Daten eine Umkreissuche durchgeführt werden, bis eine regelkonforme Position gefunden wurde. Anhand der georeferenzierten Daten können auch geeignete Bedarfsmodelle in Form von GPS Koordinaten der Start- und Zielpositionen definiert und im Rahmen der Simulation verwendet werden. Abhängig vom Anwendungsszenario können für die Vorverarbeitung des Datenbestands geeignete Werkzeuge eingesetzt werden, um bestimmte Gebiete auszuwählen oder den Datenbestand zu filtern. Dadurch können unterschiedliche Straßennetze, wie beispielsweise das Autobahnnetz eines Landes oder das detaillierte Straßennetz einer Stadt in die Datenbank importiert und anschließend in der Simulationsumgebung genutzt werden.

5.3.2.2 Funktionalität und Konfigurationsmöglichkeiten

Das für die Simulation eingesetzte Straßennetz bildet die Grundlage der Simulationen, wobei für die Umsetzung und Analyse der Verfahren anhand unterschiedlicher Szenarien im Folgenden auf die wesentlichen Funktionalitäten eingegangen wird.

Für die Realisierung des Transports von Personen oder Waren werden geeignete Fahrzeuge benötigt. In der Simulationsumgebung stehen hierfür Busse, Taxen und Lastkraftwagen (LKWs) zur Verfügung. Die Fahrzeuge unterscheiden sich dabei in den Dimensionen, dem Gewicht, der Geschwindigkeit, gegebenenfalls der Reichweite und in der verfügbaren Kapazität. Im Fall von LKWs wird zusätzlich der Typ, je nach zu transportierender Ware, definiert. Im Zusammenhang mit dem Personentransport könnte diesbezüglich auch das Vorhandensein spezieller Vorrichtungen, beispielsweise für eine barrierefreie Beförderung, angegeben werden.

Für den Fahrgasttransport kann bei der Verwendung des unterstützenden bzw. verteilten Verfahrens neben der Kapazität auch die Länge der Liste für lokale Transportanfragen in Form von Reservierungen definiert werden. In dieser Liste werden entweder die von der zentralen Instanz vorgeschlagenen Transportanfragen vermerkt oder, bei dem verteilten Verfahren, die in unmittelbarer Umgebung befindlichen, wartenden Benutzer verwaltet, die potenziell in Frage kommen. Diese lokale Reservierungsliste ist dabei unabhängig von der dezentral verwalteten Liste, die sämtliche bekannten Anfragen der Benutzer enthält. Die Anzahl der Fahrzeuge kann entweder statisch für die Simulation festgelegt werden oder dynamisch anhand des aktuellen Bedarfs vergrößert oder verkleinert werden. Der Bedarf orientiert sich dabei an der Anzahl der vorliegenden Transportanfragen und wird je nach Verfahren entweder von der zentralen Entität oder auf Basis der verteilten Liste bzw. der Anzahl unbestätigter Anfragen bestimmt. Für den direkten oder indirekten Austausch von Informationen zwischen den Fahrzeugen kann einer der vorgestellten Mechanismen festgelegt werden, wobei zusätzlich das Zeitintervall für die periodische Variante angegeben werden muss. Unabhängig vom Mechanismus kann die Kooperationsreichweite mit Hilfe eines Radius definiert werden, wodurch das Gebiet, in dem Kooperationspartner gesucht werden oder sich aufhalten, eingeschränkt werden kann. Zu den Informationen, die von den einzelnen Fahrzeugen gespeichert bzw. protokolliert werden, gehören unter anderem die zurückgelegte Distanz, die transportierten Fahrgäste, die Anzahl der gesendeten und empfangenen Nachrichten sowie die Auslastung.

Zu Beginn eines Simulationslaufes befinden sich die Fahrzeuge in Depots, deren Anzahl entsprechend konfiguriert werden kann. Die Positionen der Depots werden anhand einer Gitterstruktur angeordnet, die über das Simulationsgebiet gelegt wird, um eine gleichmäßige Abdeckung zu erreichen. Damit die Depots von den Fahrzeugen erreicht werden können, wird die initial zugewiesene Position an die nächstgelegene Straße verschoben.

Zur Bedarfserzeugung oder Generierung der zu transportierenden Benutzer in Form von Fahrgästen stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und zur Analyse unterschiedlicher Simulationsparameter unter gleichen Voraussetzungen können Fahrgastlisten erzeugt werden. Diese werden zwar vor Simulationsbeginn von der Umgebung eingelesen, aber die entsprechenden Fahrgäste bzw. Aufträge werden erst zu einem bestimmten Simulationszeitpunkt bekannt. Ein Fahrgast einer Liste ist dabei im Wesentlichen durch die Start- und Zielposition in Form von GPS Koordinaten sowie den Simulationsschritt, bei dem die Transportanfrage initiiert wird, definiert. Als zusätzliche Option können je nach Anwendungsszenario auch spezielle Anforderungen oder Zeitfenster angegeben werden. Im Zusammenhang mit dem zentralen oder dem unterstützenden Verfahren ist die Kommunikationsreichweite des Fahrgastes unendlich. Bei verteilten Verfahren kann diese, wie auch die Kooperationsreichweite der Fahrzeuge, entsprechend beschränkt werden. Beim einfachsten Bedarfsmodell werden die jeweiligen Positionen zufällig innerhalb des entsprechenden Gebiets erzeugt. Allerdings besteht auch die Möglichkeit ein Modell basierend auf ausgewählten Anziehungspunkten zu erzeugen, wobei mit Hilfe von entsprechenden Wahrscheinlichkeiten bestimmte Regionen genutzt werden. Neben der Listenform können die Fahrgäste auch dynamisch zur Laufzeit erzeugt werden, wobei in diesem Fall keine Reproduzierbarkeit und kein Vergleich unterschiedlicher Parameter gewährleistet ist. Bei der dynamischen Erzeugung kön-

nen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für das Erzeugen pro Simulationsschritt und die Anzahl der dabei zu erzeugenden Fahrgäste angegeben werden. Bei allen Varianten werden die generierten Positionen, wie schon bei den Depots, auf das nächstgelegene Straßensegment verschoben, so dass der Fahrgast von einem der Fahrzeuge abgeholt bzw. abgeliefert werden kann.

Eine Simulation endet entweder nachdem alle Fahrgäste befördert wurden oder nach einer festgelegten Zeit und erfolgt diskret, wobei ein Simulationsschritt einem definierten Zeitintervall entspricht. Neben diesem Zeitintervall kann auch die Zeit, die für das Ein- bzw. Aussteigen eines Fahrgastes benötigt wird, angegeben werden, in der ein Fahrzeug für eine entsprechende Anzahl von Simulationsschritten an einem Abhol-, Ziel- oder Transferpunkt wartet. Zudem besteht die Möglichkeit der Definition verschiedener Unternehmen, die auf unterschiedliche Fahrzeugtypen zurückgreifen können. Innerhalb des Simulationsschrittes können die einzelnen Akteure vorrangig in Form von Fahrzeugen und Fahrgästen definierte Handlungen vollziehen. Fahrgäste können warten, umsteigen oder mitfahren, wobei die entsprechenden Informationen für die spätere Auswertung protokolliert werden. Bei der Nutzung des verteilten Verfahrens versenden die Fahrgäste die Transportanfrage in der unmittelbaren Umgebung. Dabei kann sowohl der initiale Radius als auch dessen Vergrößerung pro Simulationsschritt angegeben werden. Fahrzeuge können warten oder fahren und parallel zu diesen Handlungen Nachrichten senden, empfangen und verarbeiten. Zusätzlich können unterschiedliche Parameter definiert werden. Dazu zählen die Gewichtungen und die Nutzung von einzelnen Parametern, der in Abschnitt 4.3.3.2 erläuterten Kostenfunktion, die generelle Verwendung der Optimierungsphase, die Selektion des Verfahrens und des Kooperationsmechanismus, die minimale Anzahl von Fahrgästen zur Initiierung der Kooperation sowie Schwellwerte im Zusammenhang mit der Bewertung.

Schließlich kann die Simulation durch Setzen des entsprechenden Konfigurationsparameters auch visualisiert und auf einer OSM Karte angezeigt werden. Dabei werden die von pgRouting berechneten Wegsegmente jeder Route, die als geordnete Liste vorliegen, in einer separaten Datenbanktabelle abgelegt und gegebenenfalls aktualisiert. Auch die Positionen wartender Fahrgäste werden zum Zeitpunkt an dem diese der Simulationsumgebung hinzugefügt werden zwischengespeichert und so lange vorgehalten, bis der jeweilige Fahrgast von einem Fahrzeug abgeholt wurde. Mit Hilfe von OpenLayers [233], einer in JavaScript entwickelten Schnittstelle zur interaktiven Anzeige von Karten, lassen sich die entsprechenden Informationen auf einem Overlay anzeigen und mit einer Karte hinterlegen. Zusätzlich steht eine umfangreiche Ausgabefunktionalität zur Verfügung, mit der neben den protokollierten Informationen auch die Performanz einzelner Methoden analysiert werden kann.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Umsetzung der einzelnen Verfahren eingegangen, wobei insbesondere die verwendeten Algorithmen des unterstützenden und verteilten Verfahrens behandelt werden.

5.3.2.3 Umsetzung der Verfahren und Mechanismen

Basierend auf der Simulationsumgebung und der beschriebenen Funktionalität können die zuvor beschriebenen Verfahren, auf deren Umsetzung in diesem Abschnitt eingegangen wird,

quantitativ untersucht werden.

Der Algorithmus des zentralen Verfahrens ist in Abbildung 5.23 dargestellt und arbeitet wie in Abschnitt 4.3.3.2 erläutert. Dabei wird zunächst überprüft, ob neue Reservierungen vorliegen. Ist dies der Fall, werden die Kosten für die Abholung für jedes Fahrzeug berechnet, wobei

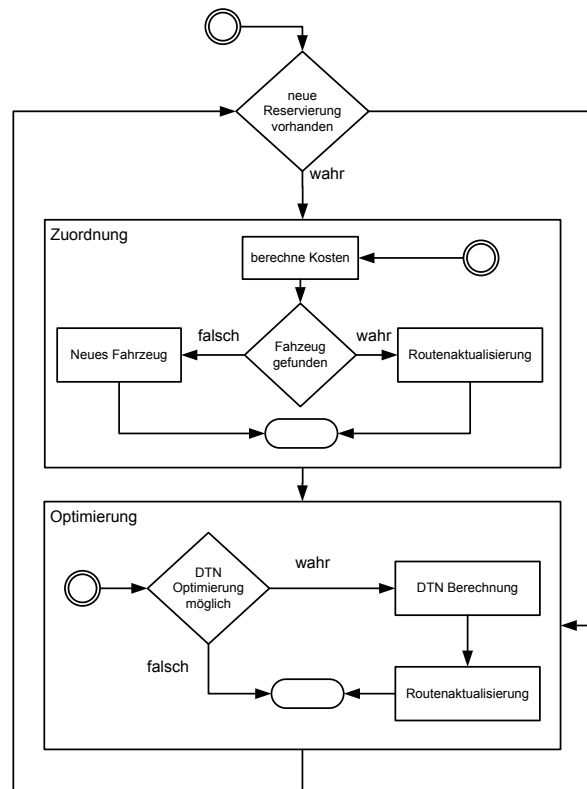
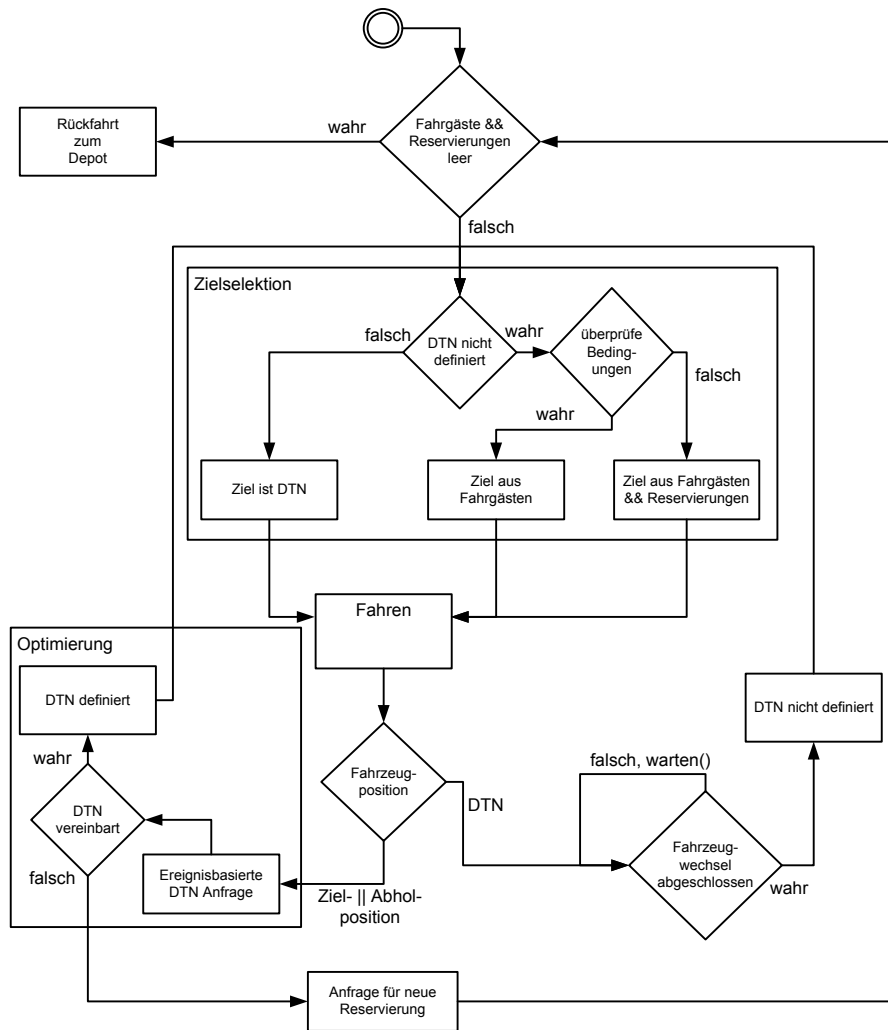


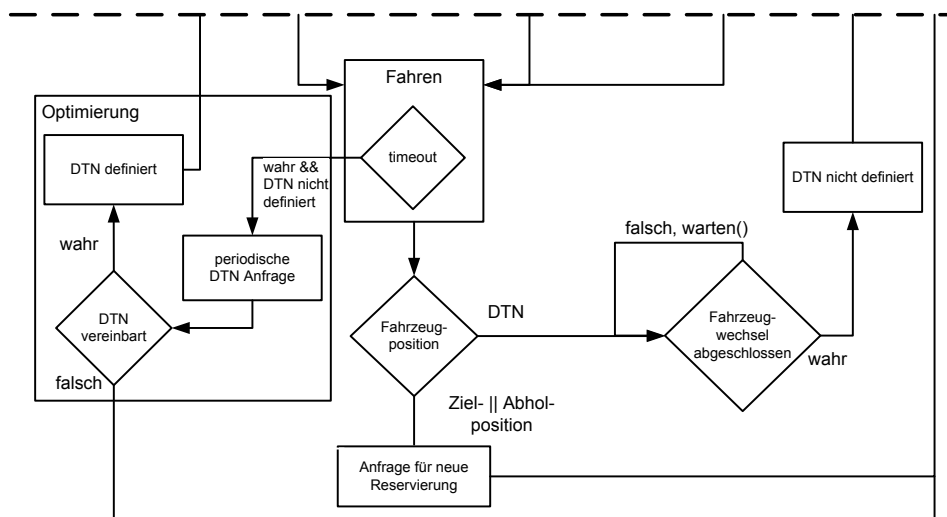
Abbildung 5.23: Algorithmus des zentralen Verfahrens für den bedarfsorientierten Transport

unter anderem auch die maximalen Fahrzeiten der aktuellen Fahrgäste berücksichtigt werden. Wurde ein geeignetes Fahrzeug gefunden, wird dessen Route aktualisiert und übermittelt. Wird kein geeignetes, aktives Fahrzeug gefunden, kann bei einer statischen Fahrzeugflotte auf ein im Depot befindliches zurückgegriffen werden oder bei einer dynamischen Flotte ein neues Fahrzeug der Simulationsumgebung hinzugefügt werden. Anschließend wird bei der Vorberechnung festgestellt, ob eine Optimierung möglich ist. Beim ereignisbasierten Mechanismus wird hierbei für jedes Fahrzeug überprüft, ob sich der Status bzw. die aktuellen Fahrgäste geändert haben. Innerhalb der definierten Reichweite wird von der Position des betroffenen Fahrzeugs nach geeigneten Kooperationspartnern gesucht. Existiert ein solcher Partner, wird im Zusammenhang mit der Optimierungsphase die Kosteneinsparung berechnet und die Route gegebenenfalls aktualisiert. Im Gegensatz zum ereignisbasierten Mechanismus wird dieser Prozess bei der periodischen Variante in regelmäßigen Abständen ausgeführt.

Beim unterstützenden Verfahren werden die Algorithmen, je nach Mechanismus, auf der Seite des Fahrzeugs ausgeführt. Dabei wird von der zentralen Instanz zunächst eine Liste mit mindestens einem wartenden Fahrgast zugewiesen. Im Anschluss wird überprüft, ob ein DTN vereinbart wurde und andernfalls das nächste Ziel vom Fahrzeug selbst bestimmt, wobei die Auswahl auf der erläuterten Kostenfunktion basiert. Beim ereignisbasierten

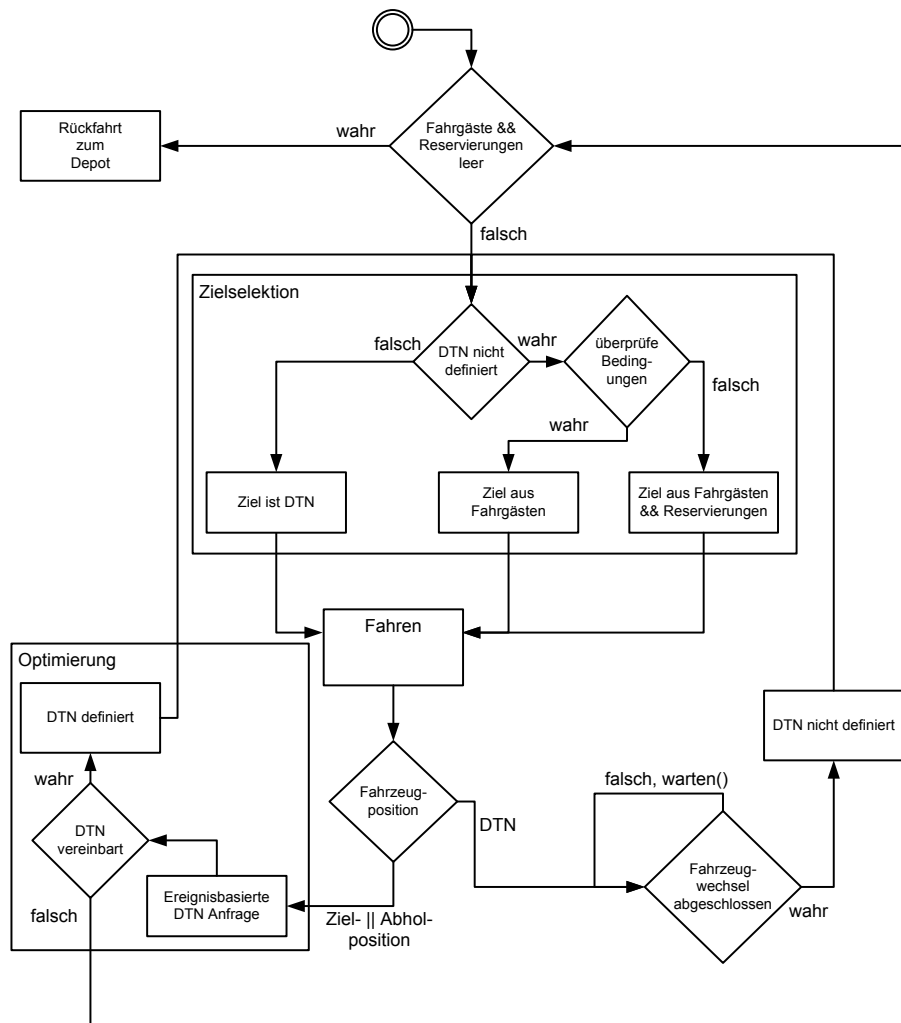


(a) ereignisbasierter Mechanismus (fahrzeugseitig)

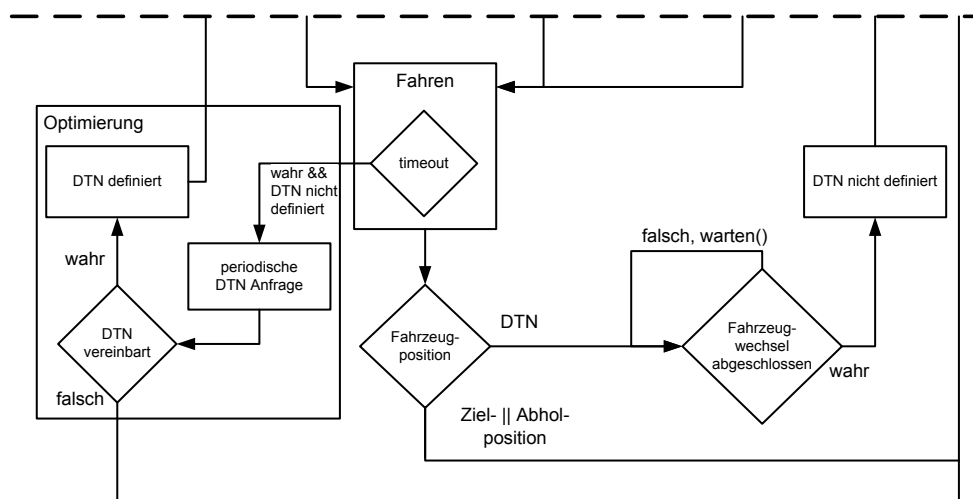


(b) Anpassungen für den periodischen Mechanismus (fahrzeugseitig)

Abbildung 5.24: Algorithmen des unterstützenden Verfahrens für den bedarfsorientierten Transport



(a) ereignisbasierter Mechanismus (fahrzeugseitig)



(b) Anpassungen für den periodischer Mechanismus

Abbildung 5.25: Algorithmen des verteilten Verfahrens für den bedarfsorientierten Transport

Mechanismus (vgl. Abbildung 5.24a) wird die Optimierung in Form einer DTN Anfrage nur initiiert, wenn sich die Anzahl der Fahrgäste geändert hat und sich das Fahrzeug an einer entsprechenden Position befindet. Der Optimierungsprozess wird hierbei verteilt ausgeführt, wie in Abschnitt 5.3.1.2 beschrieben. Beim periodischen Mechanismus (vgl. Abbildung 5.24b) wird der Optimierungsprozess in regelmäßigen Abständen während der Fahrt ausgeführt. Wird unabhängig vom gewählten Mechanismus ein DTN erreicht, wartet das erste Fahrzeug zunächst auf die Ankunft des zweiten Fahrzeugs. Anschließend wird der Transfer der Fahrgäste durchgeführt, wobei die für den eigentlichen Transfer notwendige Dauer spezifiziert werden kann. Befinden sich keine Fahrgäste in der lokalen Reservierungsliste, kehrt das Fahrzeug in das Depot zurück, aus dem es zu Beginn der Simulation gestartet ist.

Die verteilten Algorithmen (vgl. Abbildung 5.25) unterscheiden sich von denen des unterstützenden Verfahrens lediglich in der Anfrage zur Aktualisierung potenzieller Fahrgäste. Die Entscheidung, welche der Fahrgäste aus der verteilt verwalteten Liste in die lokale Reservierungsliste aufgenommen werden, trifft jedes Fahrzeug individuell. Unabhängig von der definierten Länge der lokalen Reservierungsliste verbleiben die Fahrgäste in der verteilten Liste, bis das nächste Ziel des Fahrzeugs der Abholposition des jeweiligen Fahrgastes entspricht.

Im Folgenden werden zunächst initiale Evaluierungsergebnisse vorgestellt, bevor auf die detaillierteren Analysen der unterschiedlichen Verfahren anhand geeigneter Szenarien auf existierenden Straßennetzen eingegangen wird und die jeweiligen Ergebnisse erläutert werden.

5.3.3 Einsatzmöglichkeiten der kooperativen Verfahren

Im Anschluss an die Untersuchung initialer Experimente, die auf einem einfachen, gitterförmigen Straßennetz durchgeführt wurden, wird der Einsatz von DTNs im Bereich der Logistik unter Verwendung des zentralen Verfahrens und das unterstützende sowie verteilte Verfahren mit Bezug auf den Personentransport quantitativ untersucht. Dabei werden die zugrundeliegenden Szenarien einleitend beschrieben und die jeweiligen Ergebnisse vorgestellt. Abhängig von den Szenarien wurden entsprechende Anpassungen vorgenommen.

5.3.3.1 Initiale Experimente

Zunächst werden initiale Experimente, die mit eingeschränkter Funktionalität der zuvor beschriebenen Simulationsumgebung durchgeführt, vorgestellt. Die Einschränkung bezieht sich auf das verwendete Straßennetz, das in diesem Fall einer einfachen Gitterstruktur entspricht. Dabei wird insbesondere der Effekt der Optimierung einerseits unter Verwendung einer statischen und andererseits basierend auf einer dynamischen Fahrzeugflotte untersucht. Hierfür wurden Simulationen mit und ohne die Verwendung der Optimierungsphase nach dem Prinzip der dynamischen Transferknoten durchgeführt.

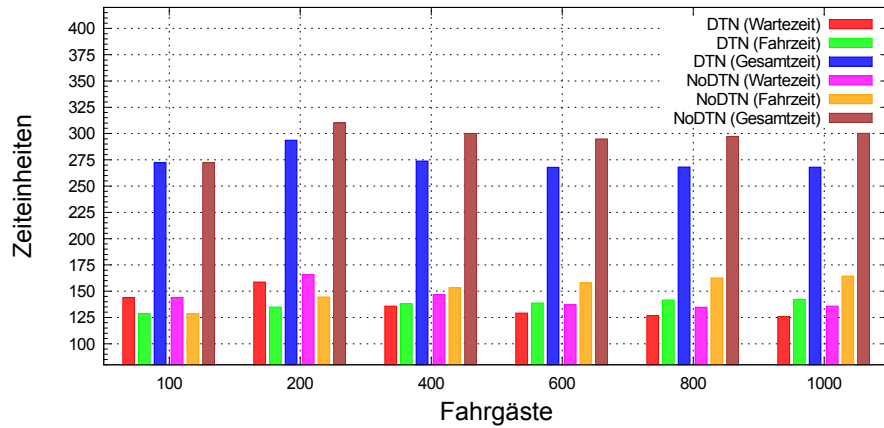
Für die folgenden Untersuchungen wurde zunächst ein einfaches Gitternetz von 100×100 Straßen und 4 gleichmäßig verteilten Depots verwendet. Die Fahrzeuge haben eine Kapazität von 10 Personen und können sich beliebig mit einer konstanten Geschwindigkeit von einem Block pro Simulationsschritt bewegen. Für die Fahrgäste wurden für jede Instanz

von 100, 200, 400, 600, 800 und 1.000 Fahrgästen je 20 Listen erzeugt, wobei eine zufällige Verteilung von Start- und Zielpunkten verwendet wurde. Bei den jeweiligen Instanzen treten die Transportanfragen der einzelnen Fahrgäste in einem Zeitraum von 500 Simulationsschritten auf. Erwähnenswert hierbei ist, dass bei sämtlichen Simulationen in Verbindung mit dem Personentransport ausschließlich dynamische Anfragen vorliegen und der Einsatz entsprechender Listen lediglich der Reproduzierbarkeit dient. Zur Einordnung entsprechender Systeme wird oft der Grad der Dynamik (englisch: Degree of Dynamism, DOD), der erstmals in [151] definiert wurde, verwendet und liegt in diesen Fällen bei 1 bzw. 100%. Im Gegensatz dazu ist dieser bei ähnlichen Problemstellungen, wie bereits erwähnt, deutlich geringer und erhöht somit zusätzlich den Grad der Komplexität bzw. die Schwierigkeit zur Lösung dieser Problemklassen. Des Weiteren wurde der unterstützende Ansatz verwendet, wobei die Fahrzeuge das nächste Ziel ausschließlich anhand der Position bestimmen. Auf der Seite des Servers wurde bei der Anfrage von Fahrzeugen nach neuen Fahrgästen neben der Distanz mit einem Gewicht von 0,7 zusätzlich die aktuelle Wartezeit mit einem Gewicht von 0,3 berücksichtigt. Als Kooperationsmechanismus wurde die ereignisbasierte Variante verwendet. Bei den Untersuchungen mit der statischen Fahrzeugflotte stand abhängig vom Fahrgastaufkommen eine entsprechende Anzahl von Fahrzeugen zur Verfügung, die in vorangegangenen Probeläufen ermittelt wurde. 9 Busse bei 100 Fahrgästen, 14 Busse bei 200 Fahrgästen, 26 Busse bei 400 Fahrgästen, 37 Busse bei 600 Fahrgästen, 47 Busse bei 800 Fahrgästen und 56 Busse bei 1.000 Fahrgästen.

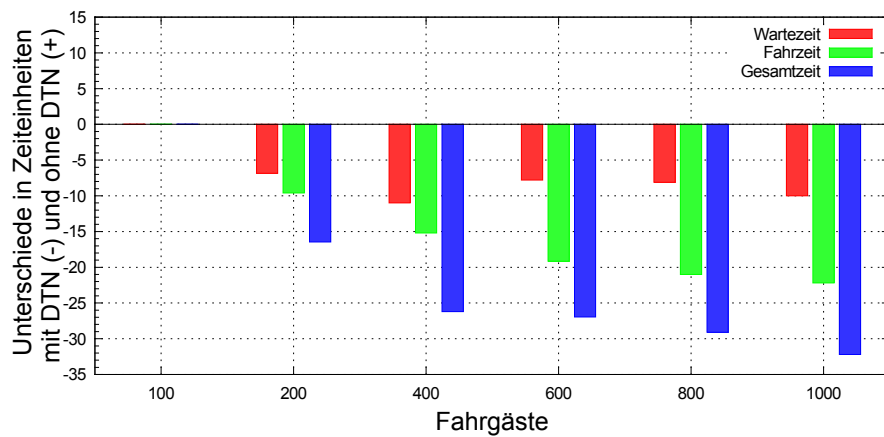
Die durchschnittlichen absoluten Warte-, Fahr- und Gesamtzeiten mit und ohne die Nutzung der Optimierung durch DTNs sind in Form von Zeiteinheiten in Abbildung 5.26a und die relativen Veränderung in Abbildung 5.26b dargestellt. Bei 100 Fahrgästen kam es auf Grund des niedrigen Aufkommens und der geringen Fahrzeugdichte zu keiner DTN Vereinbarung, wodurch sämtliche Zeiten äquivalent sind. Bei den größeren Fahrgastinstanzen ist zu erkennen, dass sowohl die Warte- als auch die Fahrzeit bei der Nutzung der Optimierung geringer ist und damit bei einer gleichen Anzahl von Fahrzeugen zu einer Verbesserung zwischen 2,2% und 10,7% bei der Gesamtzeit führt.

Der Grad der Optimierung spiegelt sich in der Anzahl der durchschnittlichen Fahrzeugwechsel wieder, die in Abbildung 5.27a veranschaulicht sind. Bei 100 Fahrgästen wurden sämtliche Fahrgäste direkt zum Ziel transportiert. Bei steigendem Fahrgastaufkommen sinkt die Anzahl der Direkttransporte von 82,35% bei 200 Fahrgästen auf 60,25% bei 1.000 Fahrgästen. Bei 200 Fahrgästen mussten 16,65% einmal und 0,95% zweimal das Fahrzeug wechseln. Zwischen 400 und 1.000 Fahrgästen kam es auch zu drei oder mehr Fahrzeugwechseln, wobei weniger als 1% betroffen waren. Wegen der Fahrzeugwechsel konnte auch die Distanz, die von allen Fahrzeugen zurückgelegt wurde, bei 200 Fahrgästen um 5,25% und bei 1.000 Fahrgästen um 8,1% reduziert werden, wie in Abbildung 5.27b dargestellt. Durch die geringeren Distanzen kann bei der Nutzung von DTNs von einer Möglichkeit zur Kosteneinsparung für einen Betreiber ausgegangen werden, wobei zusätzlich ein schnellerer Transport für die Fahrgäste erreicht wird.

Im Fall einer dynamischen Fahrzeugflotte passt sich die Anzahl der Fahrzeuge automatisch an den aktuellen Bedarf an, wobei dieser anhand der wartenden Fahrgäste bestimmt wird,



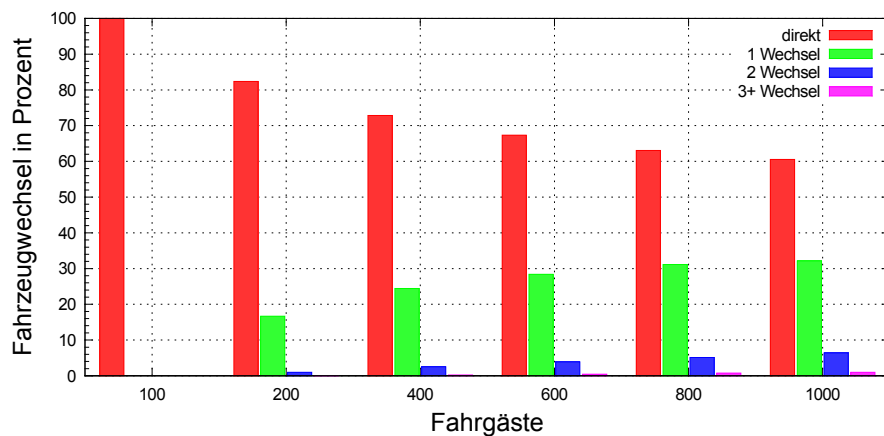
(a) absolut



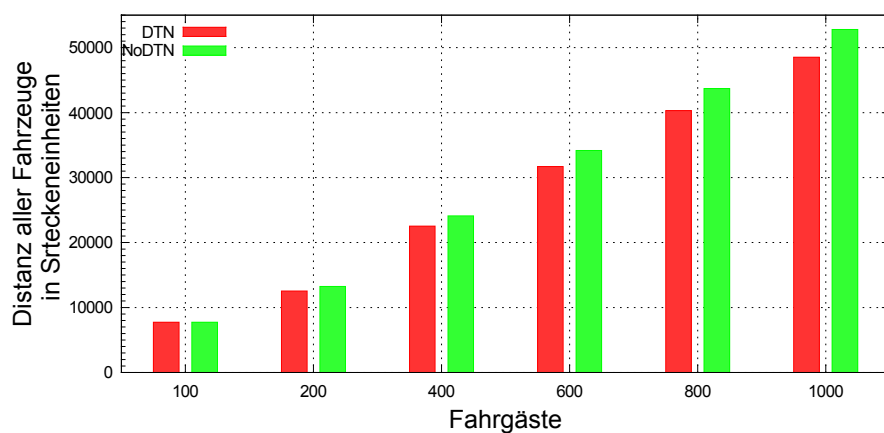
(b) relativ

Abbildung 5.26: Warte-, Fahr- und Gesamtzeit, statische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung

die den Transportwunsch bei der zentralen Instanz gemeldet haben. Dabei wird jeden zweiten Simulationsschritt überprüft, ob die Anzahl der aktiven Fahrzeuge größer als die Anzahl der in der globalen Reservierungsliste vorhandenen Fahrgäste ist. Wenn dies zweimal in Folge der Fall ist, wird ein Fahrzeug hinzugefügt. Ist die Anzahl der wartenden Fahrgäste dagegen dreimal hintereinander geringer als die der aktiven Fahrzeuge, wird eines der Fahrzeuge zurück in das entsprechende Depot geordnet und gegebenenfalls die lokalen Reservierungen der globalen Reservierungsliste hinzugefügt. Abbildung 5.28a zeigt, dass sich bei der Nutzung von DTNs zwar eine verhältnismäßig längere Wartezeit ergibt, die allerdings im Vergleich zur statischen Fahrzeugotte bei 100 Fahrgästen um 13,87% und bei 1.000 Fahrgästen um 26,09% geringer ist. Dabei kamen bei 100 Fahrgästen durchschnittlich 1 Fahrzeug mehr und bei 1.000 Fahrgästen 6 Fahrzeuge mehr zum Einsatz. Bei der dynamischen Fahrzeugotte sinkt zudem die Fahrzeit bei der Nutzung von DTNs schneller und führt damit zu einer kürzeren Gesamtfahrzeit als ohne die Optimierung, wie Abbildung 5.28b zeigt. Im Vergleich verringerte sich die Gesamtfahrzeit mit der Optimierung um 2,07% bei 200 Fahrgästen und um 3,63% bei 1.000 Fahrgästen.



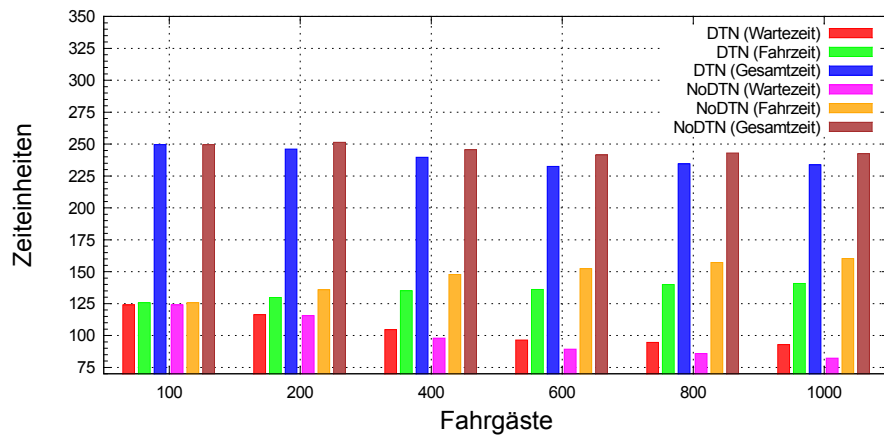
(a) Fahrzeugwechsel



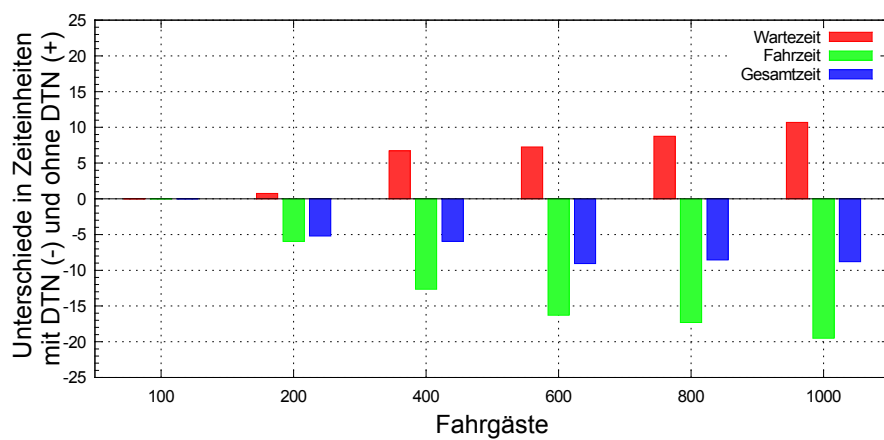
(b) Distanzen

Abbildung 5.27: Fahrzeugwechsel und Distanzen, statische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung

Die Fahrzeugwechsel, die in Abbildung 5.29a zu sehen sind, sind unwesentlich geringer als bei einer statischen Fahrzeugotte, wobei auch hier mit zunehmendem Fahrgastaufkommen die direkten Transporte abnehmen und die Transferrate zunimmt. Ein anderes Bild ergibt sich bei der Anzahl der durchschnittlich verwendeten Fahrzeuge, die im Vergleich zu den Simulationsläufen ohne Optimierung bei 200 Fahrgästen um 2,26% und bei 1.000 Fahrgästen sogar um 5,24% abnimmt, wie Abbildung 5.29b zeigt. Auch die durchschnittlich maximal benötigten Fahrzeuge weisen deutliche Unterschiede zwischen 2,25% bis zu 9,36% zu Gunsten der Nutzung von DTNs auf. Mit Hilfe der Optimierungsphase wird bei 1.000 Fahrgästen im Vergleich zur statischen mit einer dynamischen Fahrzeugotte und durchschnittlich 10,7% mehr Fahrzeugen eine Reduzierung der Gesamtfahrzeit von fast 15% erreicht. Bezüglich der Optimierung kann durch die Verwendung einer dynamischen Fahrzeugotte eine Reduzierung der benötigten Fahrzeuge erreicht werden. Zudem ergibt sich eine bessere Dienstqualität in Form der Gesamtfahrzeit und eine entsprechende Kosteneinsparungen bezüglich der benötigten Fahrzeuge im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit. Des Weiteren steigt die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge unterproportional im Vergleich zum Fahrgastaufkommen und belegt damit die Ska-



(a) absolut

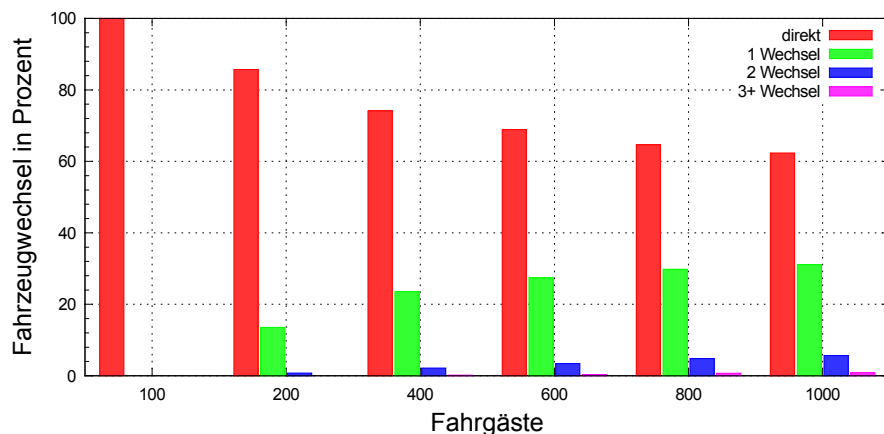


(b) relativ

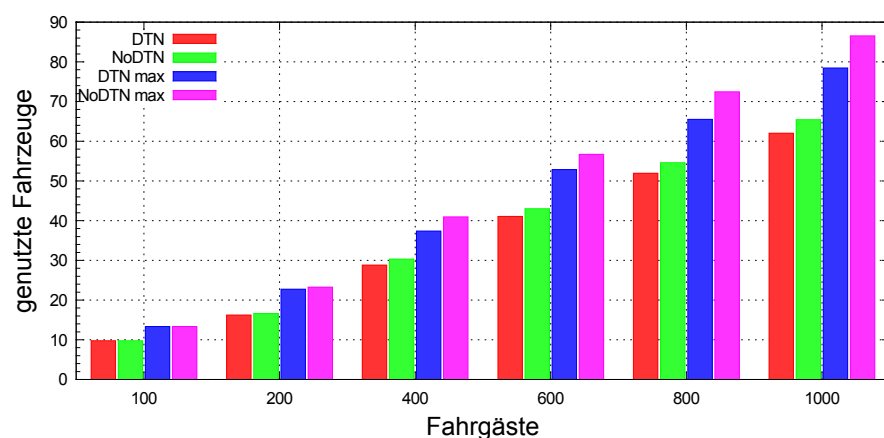
Abbildung 5.28: Warte-, Fahr- und Gesamtzeit, dynamische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung

lierbarkeit, die bei steigendem Fahrgastaufkommen sogar zu besseren Ergebnissen führt. Im Vergleich zu einem proportionalen Verhältnis zwischen Fahrzeugen und Fahrgastaufkommen werden, im Verhältnis zur Instanz von 400 Fahrgästen, bei 600 Fahrgästen 2,2%, bei 800 Fahrgästen 5,7% und bei 1.000 Fahrgästen 10% weniger Fahrzeuge zum Transport benötigt. Wird die Instanz von 800 Fahrgästen als Referenz verwendet, liegt die Anzahl der tatsächlich benötigten Fahrzeuge bei 1.000 Fahrgästen um 6,5% unter einem proportionalen Anstieg. Aus Sicht der Benutzer kann durch den Einsatz einer dynamischen Fahrzeugflotte die Gesamtzeit reduziert werden, wobei zwar durchschnittlich mehr Fahrzeuge im Vergleich zu einer statischen Flotte benötigt werden, deren Anzahl aber, wie erläutert, unterproportional im Verhältnis zum Fahrgastaufkommen zunimmt.

Basierend auf den initialen Untersuchungen wird durch die Verwendung von DTNs bei einer statischen Fahrzeugflotte einerseits die Gesamtzeit für den Fahrgasttransport und andererseits die Distanz, die von den Fahrzeugen zurückgelegt wird, reduziert. Im Zusammenhang mit einer dynamischen Fahrzeugflotte kann durch einen verhältnismäßig geringen Mehreinsatz von Fahrzeugen die Gesamtzeit nochmals deutlich verringert werden. Der Fahrzeugmehreinsatz



(a) Fahrzeugwechsel



(b) Fahrzeugnutzung

Abbildung 5.29: Fahrzeugwechsel und Fahrzeugnutzung, dynamische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung

steigt dabei mit steigendem Fahrgastaufkommen unterproportional und belegt damit die Skalierbarkeit bei der Verwendung des Prinzips der dynamischen Transferknoten. Allerdings kann das Verhalten auf dem verwendeten Gitterstraßennetz von einem realistischen Verkehrsnetz abweichen, weshalb in den folgenden Abschnitten eingehendere Untersuchungen anhand unterschiedlicher Szenarien auf Basis existierender Straßennetze vorgestellt werden.

5.3.3.2 Logistik - Kooperativer Warentransport in Afrika

Neben dem Personentransport ist der Einsatz von DTNs auch für den Warentransport denkbar. Der Transport von Waren bildet das Rückgrat für das wirtschaftliche Wachstum und den damit verbunden Wohlstand. Insbesondere in den Entwicklungs- und Schwellenländern erfolgt dieser Transport oftmals ineffizient und stellt damit einen Engpass für die kommerzielle Nutzung von Rohstoffen oder den Export von landwirtschaftlichen Produkten dar, was sich negativ auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit auswirkt. Für den Einsatz von DTNs im Bereich der Logistik muss gewährleistet sein, dass die Waren umgeladen werden können. Hierfür könnten beispielsweise in die Fahrzeuge integrierte Gabelstapler für

Paletten oder mobile Pumpen für üssige Transportgüter verwendet werden. Eine weitere Einschränkung betrifft die Transferknoten selbst, an denen in diesem Fall eine geeignet große Fläche für den Umladevorgang vorhanden sein muss. Vergleichbar mit den Regeln der Straßenverkehrsordnung können mögliche DTNs anhand entsprechender Charakteristika, wie beispielsweise der verfügbaren Fläche oder gegebenenfalls des Vorhandenseins benötigter Infrastruktur, gefiltert und ausgewählt werden.

Für die Simulation des zentralen Verfahrens wurde zunächst das Autobahn- bzw. Straßennetz von Tansania, Afrika, aus dem OSM Daten extrahiert. Tansania wurde gewählt, da in [198, 105, 272] Zahlen über das Distributionsmodell und unterschiedliche Aspekte, wie die zurückgelegten Distanzen, das Transportvolumen oder die Art der Waren, verfügbar waren und für einen Vergleich herangezogen werden konnten. Nach diesen Informationen erreichen etwa 80% der Importe die Hafenstadt Dar es Salaam und müssen auf dem Landweg zu den jeweiligen Bestimmungsorten transportiert werden. Insgesamt verlassen 50% der Waren Dar es Salaam und müssen zuvor dorthin transportiert werden. Anhand dieser Werte wurde ein Distributionsmodell entwickelt, welches unter anderem diese prozentualen Angaben widerspiegelt. Darauf basierend wurden Auftragslisten erzeugt, bei denen Waren zu einem bestimmten Simulationszeitpunkt von einem Ort zum anderen transportiert werden müssen. Die erzeugten Listen enthalten dabei entweder 25, 50, 75 oder 100 Aufträge, wobei für jede Instanz mindestens 15 unterschiedliche Listen generiert und für den Vergleich verwendet wurden. Ein Auftrag besteht dabei aus dem Volumen bzw. der Stückzahl, dem Typ der Ladung, dem Simulationsschritt ab dem der Auftrag gültig ist, einer Startposition und einer oder mehreren Zielpositionen mit dem jeweils zu entladenden Volumen. Aus [105] ergibt sich auch ein Kostenmaß für Auftraggeber, welches 1995 bei einem Preis von 0,087 US Dollar (bis 13 Tonnen) und 0,96 US Dollar über (13 Tonnen) pro Tonnenkilometer lag. Die laufenden Kosten für den Transportanbieter belaufen sich in Tansania auf rund 0,15 US Dollar pro Kilometer, wobei der Monatslohn eines Fahrers bei rund 140 US Dollar liegt.

Für die Kooperation zwischen LKWs muss zusätzlich gewährleistet sein, dass die Ladung kompatibel zum Fahrzeugtyp ist. Wenn dies nicht der Fall ist, kann keine Kooperation und damit keine Optimierung durch DTNs stattfinden. Neben dem Typ der Ladung werden vom Server noch das Ziel oder die Teilziele der Waren berücksichtigt, wobei das zugrundeliegende Problem dem PDP entspricht. Hinzu kommt, dass die Kapazität der Fahrzeuge bei einem Umladevorgang nicht überschritten werden darf. Allerdings wird insbesondere in Tansania keine gute Auslastung der Fahrzeugkapazität erreicht, so dass der vorgeschlagene Kooperationsansatz diesbezüglich ebenfalls zu einer Verbesserung führt. Im Zusammenhang mit der Optimierungsphase wird in diesem Fall anstelle des Clusterings eine Lösung für das kapazitätsbeschränkte PDP Problem berechnet, welche auch im Zusammenhang mit den Kostenschätzungen verwendet wird. Allerdings wird davon ausgegangen, dass für jeden Auftrag bereits ein Transportfahrzeug zur Verfügung steht und somit die initiale Zuordnung feststeht. Damit konzentriert sich diese Untersuchung im Wesentlichen auf die Effekte der Optimierungsphase mit den beschriebenen Anpassungen. Dabei werden zunächst Fahrzeuge gesucht, die einen geeigneten Abstand zueinander haben. Unter Abstand wird hierbei die Fahrzeit verstanden in der die Fahrzeuge sich treffen könnten. Sind solche Paare gefunden

worden, wird der Typ der Ladung auf Kompatibilität überprüft. Anschließend werden mögliche Kombinationen von einzelnen Auftragspositionen bestimmt und unter Berücksichtigung der Kapazität auf die Fahrzeuge verteilt. In diesem Zusammenhang werden die Kosten für jede der Kombinationsmöglichkeiten bestimmt und entweder für einen Vergleich mit möglichen anderen Kooperationspartnern herangezogen oder wenn es sich um die beste lokale Lösung handelt, überprüft, ob die Kooperation rentabel ist. Hierzu werden die Kosten eines generischen Ansatzes bzw. des direkten Transports mit denen des kooperativen Ansatzes verglichen. Ergibt sich dabei eine Kosteneinsparung, wird der Transfer vollzogen. Dazu werden die notwendigen Informationen, der DTN, die Route sowie die zu transferierenden Auftragspositionen an die betroffenen Fahrzeuge übermittelt und von diesen bestätigt.

Die Distanzen bei nationalen Transporten können entsprechend groß sein und daher ist auch mit Fahrzeiten von mehr als 20 Stunden zu rechnen. Im Gegensatz zum innerstädtischen Verkehr und je nach Rechtslage im Land sind Ruhezeiten für die Fahrer vorgeschrieben und werden daher bei der Planung entsprechend berücksichtigt.

Damit festgestellt werden kann, ob ein Transfer - in diesem Fall von Waren - zu einer Verbesserung führt, wird für die Kostenschätzung neben der Fahrzeit bzw. der Distanz auch die Arbeitszeit für das Umladen sowie die Ruhezeiten des Fahrers berücksichtigt. Die in Abschnitt 4.3.3.2 erläuterte Kostenschätzung für einen Transfer setzt sich in diesem Fall aus den Transport- und Arbeitskosten zusammen. In den Ruhepausen fallen dabei lediglich die Arbeitskosten an, da hierbei keine Distanz zurückgelegt wird. Die Kosten c_{O_i, D_i} für den Transport von der aktuellen Position O_i eines Fahrzeugs zum Bestimmungsort D_i setzen sich dabei aus der Distanz zwischen den jeweiligen Positionen $d(O_i, D_i)$ multipliziert mit Kosten pro Kilometer c_{km} zusammen. Anhand der Routeninformation werden die Arbeitskosten basierend auf der erwarteten Fahrzeit inklusive der Ruhezeiten $t(O_i, D_i)$ bestimmt und mit dem entsprechenden Stundensatz c_h multipliziert. Durch Addition dieser Werte ergibt eine Kostenschätzung für die jeweilige Strecke. Die Kosten für den Umladevorgang $c_{Transfer}$ in Form von der Arbeitszeit variieren abhängig von der Art der Waren und dem Volumen bzw. der Stückzahl.

$$\begin{aligned} c_{O_i, D_i} &= d(O_i, D_i) \times c_{km} + t(O_i, D_i) \times c_h \\ c_{Transfer} &= \text{Faktor}_{Ware} \times \text{Anzahl}_{i, Ware} \times c_h \end{aligned} \tag{5.4}$$

Der zentrale DTN Ansatz, mit den genannten Anpassungen, wurde im Rahmen von unterschiedlichen Simulationsläufen mit dem herkömmlichen bzw. direkten Transport verglichen. Neben dem Straßennetz wurden 23 Städte in Form von Depots ausgewählt, die als Start- bzw. Zielpunkt für Aufträge in Frage kommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass für jeden Auftrag ein Transportfahrzeug am Startpunkt zur Verfügung steht und nach Beendigung wieder zum Ausgangspunkt zurückkehrt. Somit entfallen im Vergleich zum Personentransport dynamisch hinzukommende Reservierungen, die daher nicht bei der Tourenplanung berücksichtigt werden. Das Intervall, in dem die unterschiedlichen Auftragsinstanzen zur Simulationsumgebung hinzugefügt werden, beträgt 24 Stunden. Die Transportfahrzeuge haben ein Ladevolumen von 34 Einheiten und eine maximale Geschwindigkeit von 80 km/h, die in der Regel durch die Geschwindigkeit des Straßentyps deutlich niedriger ist. Zusätzlich kann die Geschwindigkeit unter Verwendung eines Zufallswertes modelliert werden, um realitätsnahe Fahrzeugbewegun-

gen zu simulieren. Angenommen auf der Straße ist eine Geschwindigkeit von 50 km/h möglich, so wird zur Hälfte dieser Geschwindigkeit die andere Hälfte, multipliziert mit einer Zufallszahl, addiert:

$$\begin{aligned} \text{Geschwindigkeit}_{\text{aktuell}} = & 0.5 \times \text{Geschwindigkeit}_{\text{möglich}} \\ & + \text{Zufallszahl}[0..1] \times \text{Geschwindigkeit}_{\text{möglich}} \end{aligned} \quad (5.5)$$

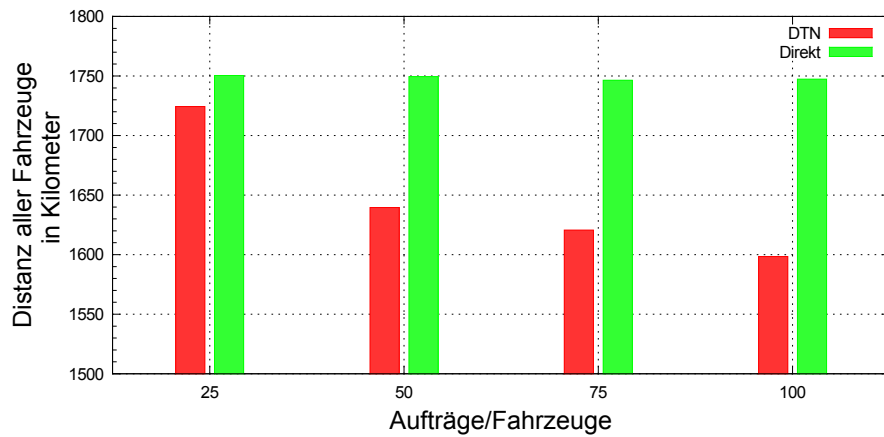
Somit liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf diesem Streckenabschnitt zwischen 25 und 50 km/h. Da bei der Schätzung der Transportkosten eine konstante Durchschnittsgeschwindigkeit angenommen wird, führt diese Modellierung zu unerwarteten Verzögerungen, wobei die beteiligten Fahrzeuge gegebenenfalls eine längere Zeit auf das Eintreffen des Kooperationspartners warten müssen. Zusätzlich werden auch die Gesamtkosten beeinflusst, da das Fahrzeug für die gleiche Distanz entsprechend mehr Zeit benötigt. Auf Grund des angesprochenen Platzbedarfs steht für mögliche Umladevorgänge keine beliebige Anzahl zur Verfügung. Im Fall von Tansania wurden für die Simulationen insgesamt 184 mögliche Plätze semiautomatisch identifiziert. Trotz dieser Einschränkung kann aus diesen begrenzten Optionen abhängig von der Position und aktuellen Route der Fahrzeuge von der zentralen Entität ein geeigneter Umladeplatz als DTN ausgewählt werden. Um die unterschiedlichen Geschwindigkeiten berücksichtigen zu können, übermitteln die Fahrzeuge im Abstand von 10 Minuten ihren aktuellen Status in Form von der Position, der bis zur Ruhepause verbleibenden Fahrzeit, der Ladung und den jeweiligen Bestimmungsorten. Während sich die Fahrzeuge auf dem Weg befinden, überprüft der Server anhand der Statusinformationen, ob eine Kooperation zwischen den Fahrzeugen möglich und rentabel ist. Dabei wird der zuvor erwähnte Kooperationsprozess mit Hilfe des periodischen Mechanismus alle 20 Minuten ausgeführt, wobei die Distanz in Frage kommender Fahrzeuge nicht in Form der Luftlinie, sondern basierend auf der tatsächlichen Strecke ermittelt wird, die unter idealen Bedingungen innerhalb einer Stunde zurückgelegt werden kann. In diesem Zusammenhang wird auch den unterschiedlichen Straßenarten und möglichen Geschwindigkeiten Rechnung getragen. Bezüglich des Transportbedarfs in Form eines Distributionsmodells wird nach den Informationen aus [198] angenommen, dass 35% der Warentransporte national sind, weshalb eine entsprechende Anzahl von Start- und Zielpunkten zufällig aus den 23 Städten gewählt wurde. Von den verbleibenden 65% sind zwei Drittel von 80% der Startpunkte in Dar es Salaam und 10% in Tanga. Ein Drittel von 50% der Exporte hat Dar es Salaam als Ziel und 25% Tanga. Die verbleibenden Start- und Zielpunkte werden wiederum zufällig aus den übrigen 21 Städten gewählt. Bei 100 Aufträgen sind demnach 35 Aufträge beliebige Inlandstransporte, 35 Aufträge haben Dar es Salaam als Startpunkt mit einem beliebigen Ziel und 4 Aufträge verlassen Tanga innerhalb des 24 Stunden Intervalls. Die übrigen 26 Aufträge haben Start- und Zielpunkte aus den verbleibenden Städten.

Das in der Simulationsumgebung verwendete Straßennetz ist zusammen mit den Städten in Abbildung 5.30 dargestellt. Im Rahmen der Simulation wurden jedoch keine Verzögerungen, die durch Unfälle oder nicht passierbare Straßen verursacht werden können, berücksichtigt. Außerdem wurde lediglich ein Typ an Waren definiert, was eine Kooperation zwischen allen beteiligten Fahrzeugen ermöglicht. Die Distanzen, die von den Waren beim direkten Transport zurückgelegt wurden, lagen im Schnitt bei rund 875 Kilometern über allen Instanzen,

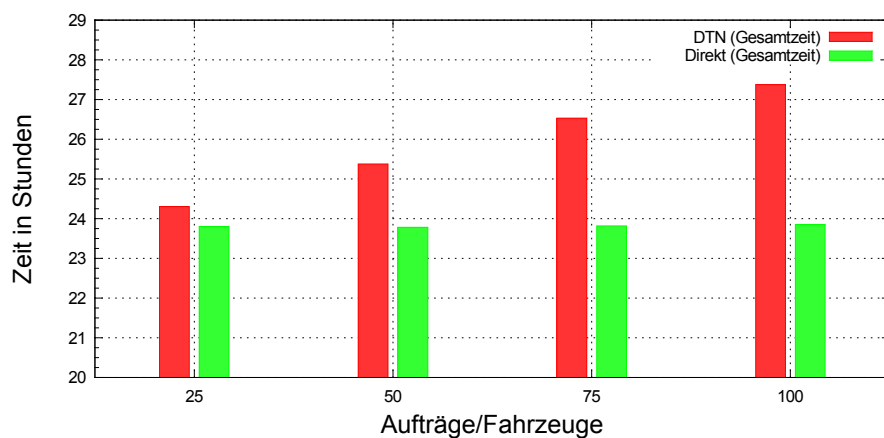


Abbildung 5.30: Straßennetz und Städte von Tansania

wobei die durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge ca. 38 km/h betrug. Diese Ergebnisse entsprechen somit den Informationen aus [105], weshalb von einem realitätsnahen Distributionsmodell ausgegangen werden kann. Die durchschnittlich zurückgelegten Distanzen der Fahrzeuge für beide Ansätze sind in Abbildung 5.31a dargestellt. Diese sind beim direkten Transport inklusive des Rückwegs über alle Instanzen relativ konstant und lassen somit einen guten Vergleich zwischen den unterschiedlichen Auftragsinstanzen zu. Unter Verwendung des kooperativen Ansatzes beträgt die eingesparte Distanz, inklusive des Rückwegs zur jeweiligen Startposition, 25 Kilometer pro Fahrzeug bei 25 Aufträgen. Dies kann damit erklärt werden, dass sich auf Grund der großen Fläche nur wenige Fahrzeuge in Kooperationsreichweite befanden und daher auch kaum Umladevorgänge stattgefunden haben. Bei 100 Aufträgen beträgt die Einsparung im Schnitt ca. 150 Kilometer pro Fahrzeug, was durch die höhere Fahrzeugdichte und die damit gestiegene Wahrscheinlichkeit zur Kooperation erklärt werden kann. Insgesamt konnten bei 100 Aufträgen insgesamt 14.896 Kilometer eingespart werden. Bei laufenden Kosten von 0,067 US Dollar pro Kilometer und zusätzlichen Kosten für den Reifenverschleiß von 0,082 US Dollar pro Kilometer [105] belaufen sich die Einsparungen bei einer Flotte von 100 Fahrzeugen auf rund 2.213 US Dollar und entsprechen damit dem 16-fachen monatlichen Gehalt eines Fahrers in Tansania. Die insgesamt zurückgelegten Distanzen beim direkten Transportansatz aller Fahrzeuge betrugen für 25 Aufträge 43.759 Kilometer und 174.738 Kilometer für 100 Aufträge. Die Zeiten bis zum Eintreffen der Waren am jeweiligen Bestimmungsort sind in Abbildung 5.31b dargestellt. Dabei verlängerte sich bei 100 Aufträgen die durchschnittliche Lieferzeit um 14,7% gegenüber dem direkten Transport. Allerdings konnte dafür sowohl die Zeit bis zur Rückkehr zum Ausgangspunkt um 7,3% als



(a) Distanzen pro Fahrzeug (Hin- und Rückweg)



(b) Zeiten bis zur Lieferung

Abbildung 5.31: Vergleich zwischen DTN und direktem Warentransport in Tansania

auch die durchschnittlich zurückgelegte Distanz eines Fahrzeugs um 8,5% reduziert werden. Somit können die Fahrzeuge durch die Einsparung der gefahrenen Kilometer wieder früher für den nächsten Transport eingesetzt werden. Bezüglich des Lebenszyklus eines Fahrzeugs ergibt sich langfristig eine effizientere Nutzung durch eine insgesamt bessere Auslastung. Die längeren Lieferzeiten beim kooperativen Transport sind einerseits auf die um 20,8% gestiegene Umladezeit bei 100 Aufträgen und andererseits auf die zusätzliche Distanz zum Erreichen eines Transferpunktes zu erreichen, zurückzuführen. Die durchschnittliche Steigerung der zurückgelegten Distanzen eines Auftrags lag bei 10,4%.

Bei dem beschriebenen Einsatzgebiet wurde das zentrale DTN Verfahren zur Kooperation zwischen Fahrzeugen eingesetzt. Wie die Ergebnisse der Simulation gezeigt haben, können dadurch einerseits die Kosten in Form der Distanz, die von den Fahrzeugen zurückgelegt werden muss, erheblich verringert werden und andererseits sind die Fahrzeuge zu einem früheren Zeitpunkt wieder einsatzbereit und können weitere Warentransporte durchführen und somit eine wirtschaftlichere Nutzung fördern. Die genannten Aspekte tragen daher erheblich zur Kostenreduktion und Effizienzsteigerung bei, wobei in diesem Fall im Durchschnitt über alle Instanzen eine Verlängerung der Lieferzeit von 2 Stunden einer Distanzeinsparung von

100 Kilometer pro Fahrzeug gegenübersteht. Eine alternative Einsatzmöglichkeit im Gegensatz zum LKW Fernverkehr wäre die Nutzung von dynamischen Transferknoten im busbasierten Personenfernverkehr. Im Gegensatz zu Waren kann hierbei zusätzlich Zeit für den eigentlichen Transfer eingespart werden und somit zu einer Senkung der Transportdauer führen. Zusätzlich werden in diesem Zusammenhang geringe Anforderungen an die Größe der Umlade-äche gestellt, wodurch sich potenziell auch die Anzahl der möglichen Transferpunkte und damit der Effekt durch die Optimierung steigern ließe.

5.3.3.3 DTNs für den bedarfsorientierten Transport in Barcelona und München

Im Rahmen dieser Arbeit steht allerdings nicht der nationale Warentransport im Vordergrund, sondern die Mobilität für Personen in urbanen Gebieten. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden und begrenzten Ressourcen in Form von Straßen sowie den steigenden Rohstoffkosten wird deutlich, dass der öffentliche Personenverkehr eine Schlüsselrolle für nachhaltige Mobilität einnehmen wird. In Deutschland nutzten rund 28 Millionen Menschen den öffentlichen Personenverkehr, wodurch die Anzahl der Einzelfahrten im Individualverkehr um 18 Millionen gesenkt werden konnte [318]. Dabei arbeiteten öffentliche Verkehrssysteme mit festen Routen und statischen Fahrplänen. Ein gewisser Grad bezüglich der Bedarfsorientierung wird dabei durch die verkürzten Taktzeiten in der Rushhour und einer entsprechenden Erhöhung in den späten Abendstunden erreicht. Eine Spezialisierung des bedarfsorientierten Transports stellen so genannte Tür-zu-Tür Transporte dar. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass die Fahrgäste an der Haustür abgeholt und direkt, ohne einen Fahrzeugwechsel, zum Ziel transportiert werden. Insbesondere bei diesen Transportsystemen werden die Transportwünsche in der Regel im Vorfeld angekündigt und können im Anschluss entsprechend geplant und organisiert werden. Dies führt allerdings bei vorwiegend oder ausschließlich dynamischen Anfragen zu Problemen bezüglich der Skalierbarkeit. Im Folgenden wird das Prinzip der dynamischen Transferknoten im Rahmen eines bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transportsystems verwendet, welches als exible Ergänzung zum öffentlichen Verkehr betrachtet werden kann und sich dabei stärker an den Bedarf der potenziellen Fahrgäste anpasst. Die folgende Untersuchung konzentriert sich, wie auch schon bei den initialen Experimenten, auf den Nutzen der Optimierungsphase unter Verwendung von DTNs. Im Gegensatz zu bisherigen Tür-zu-Tür Transporten, bei denen keine Fahrzeugwechsel vorgesehen sind, sollen diese für eine bessere Skalierbarkeit des Systems sorgen, wobei die Anfragen dynamisch erfolgen und somit keine Planung einer optimalen Route im Vorfeld gegeben ist. Zur Verdeutlichung der Funktionsweise sind in Abbildung 5.32 typische Szenarien für das verteilte Verfahren dargestellt. Um jedes Fahrzeug und jeden wartenden Fahrgast beschreibt ein Kreis die aktuelle Kooperations- bzw. Kommunikationsreichweite, in der Informationen ausgetauscht werden können. Die roten Personen stellen Ziele von Fahrgästen dar, die sich bereits in den Fahrzeugen befinden. Die gepunkteten Linien beschreiben die aktuelle oder alte Route des Fahrzeugs. Die durchgehende Linie zeigt dagegen die Änderung in Form der neu geplanten Route.

Am unteren Rand steuert ein Fahrzeug das Ziel eines aktuellen Fahrgastes an, um diesen abzusetzen. Dabei kommt das Fahrzeug in die Kommunikationsreichweite eines wartenden Fahrgastes und kann diesen in die lokale Reservierungsliste aufnehmen, wobei

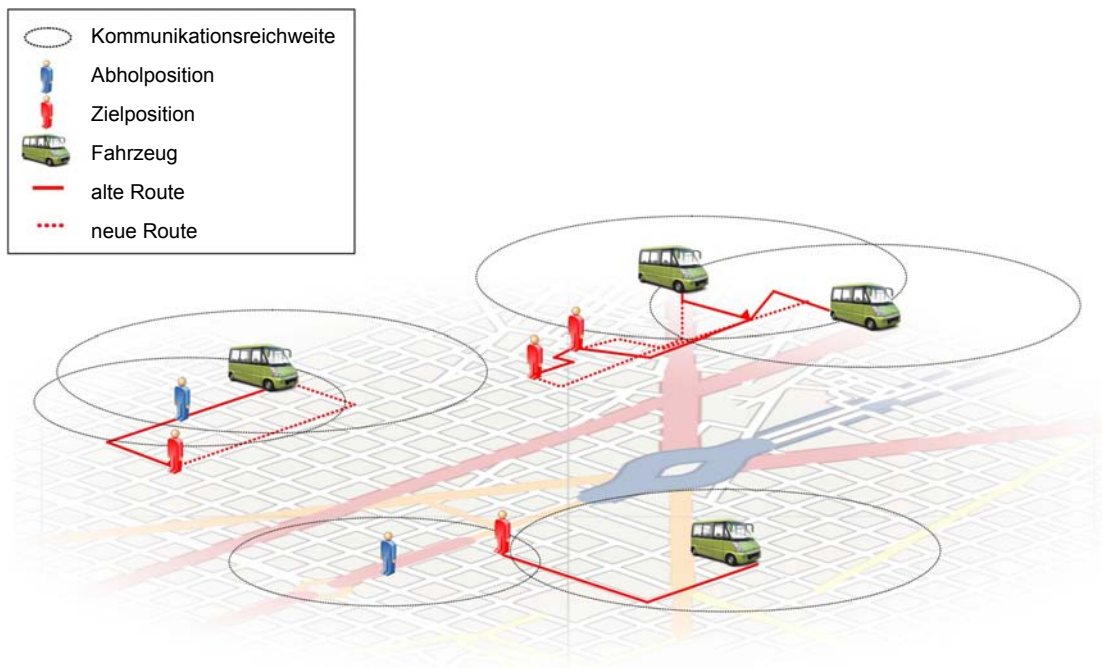


Abbildung 5.32: Szenarien für den verteilten Ansatz mit DTNs

die Transportanfrage zusätzlich in einer zwischen den Fahrzeugen verteilten Liste verwaltet wird. Anschließend hängt es vom Fahrzeug bzw. den aktuellen Fahrgästen ab, wann die Abholposition bei der Routenplanung berücksichtigt wird oder ob beispielsweise eine Überschreitung der maximalen Fahrzeit gegeben ist, so dass die Transportanfrage von diesem Fahrzeug zurückgestellt wird. Durch die verteilte Verwaltung entsprechender Anfragen besteht alternativ die Möglichkeit, dass ein wartender Fahrgast von anderen Fahrzeugen abgeholt wird.

Bei dem Fahrzeug auf der linken Seite ist das nächste Ziel zunächst die Zielposition eines Fahrgastes. Während dieses Ziel angefahren wird sendet ein neuer wartender Fahrgast, der sich bereits in Kommunikationsreichweite des Fahrzeugs befindet, eine Transportanfrage. Da der neue Fahrgast auf einer alternativen Route zum ursprünglichen Ziel des Fahrzeugs liegt, wird die Route so angepasst, dass zunächst der wartende Fahrgast zusteigen kann, ehe der bereits im Fahrzeug befindliche Fahrgast zu seinem Ziel befördert wird. In diesem Fall liegt die Abholposition näher am Fahrzeug bzw. ist schneller von diesem zu erreichen, wobei auch keine Fahrzeitbeschränkung der aktuellen Fahrgäste verletzt sein darf. Im Anschluss kann die Fahrt zum ursprünglichen Ziel fortgesetzt werden.

Am oberen Rand der Abbildung befinden zwei Fahrzeuge in Kooperationsreichweite und tauschen unter anderem die Ziele der jeweiligen Fahrgäste aus. Da die entsprechenden Zielpositionen der jeweiligen Fahrgäste einem Cluster zugeordnet werden können und somit einen geringen Abstand zueinander haben, wird ein DTN vereinbart, an dem einer der Fahrgäste das Fahrzeug wechselt. Nachdem der Fahrzeugwechsel vollzogen ist, wird in diesem Beispiel lediglich ein Fahrzeug benötigt um beide Fahrgäste zu den gewünschten Bestimmungsorten zu transportieren. Das andere Fahrzeug, welches gegebenenfalls andere Fahrgäste aufgenommen hat, kann die Dienstleistung fortsetzen.

Die Grundlage der Simulationen bilden hierbei ebenfalls realistische urbane Straßennetze, bei denen unter anderem Geschwindigkeitsbegrenzungen, Einbahnstraßen und Durchfahrtsbeschränkungen in Form von Fahrzeuggewicht oder Fahrzeugdimensionen berücksichtigt werden. Bezüglich der DTNs ist deren Position nicht von der verfügbaren Fläche abhängig, sondern im Wesentlichen von der Straßenverkehrsordnung. Daher werden beispielsweise Stadtautobahnen oder Hauptstraßen, bei denen kein sicherer Fahrzeugwechsel gewährleistet werden kann, bei der Suche nach möglichen Transferpunkten ausgeschlossen. Bei Anwohner- oder vergleichbaren Seitenstraßen kann die Position allerdings nahezu beliebig gewählt werden. Daher ist deren Anzahl wesentlich höher als bei den Simulationen des vorigen Abschnitts. Neben dem allgemeinen Nutzen der Optimierungsphase wird zusätzlich noch der Einfluss unterschiedlicher Straßennetzmorphologien analysiert, wobei die Straßennetze der Städte Barcelona und München als typische Vertreter verwendet wurden. Das Straßennetz von Barcelona ist vergleichbar mit dem von Manhattan und gehört zur Kategorie der Gridmorphologien, wohingegen die Straßen von München einer Ring-Stern Struktur zuzuordnen sind [101]. Beide verwendeten Straßennetze sind in den Abbildungen 5.33b und 5.33a dargestellt und umfassen 43 km² in Barcelona und 68 km² in München. Vergleichbar mit den Start- und Zielpunkten der

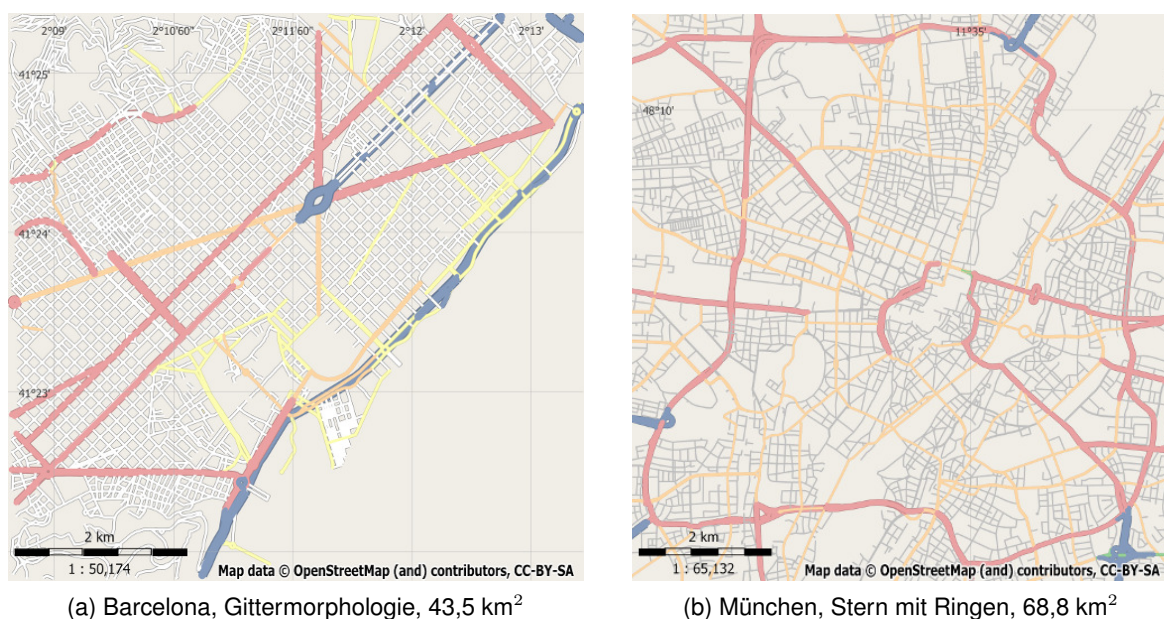


Abbildung 5.33: Verwendete Straßennetze

LKWs aus dem vorigen Abschnitt starten die verwendeten Fahrzeuge aus Depots und kehren zu diesen zurück, wenn entweder keine Fahrgäste mehr transportiert werden müssen oder die Fahrzeuge auf Grund einer geringeren Nachfrage nicht mehr benötigt werden. Für jede der beiden Städte wurde die Anzahl auf 9 Depots festgelegt. Die eingesetzten Fahrzeuge in Form von Bussen haben eine Kapazität von 10 Personen, wobei zusätzlich 5 Personen in die lokale Reservierungsliste aufgenommen werden können. Weitere Parameter beziehen sich auf die Merkmale des Fahrzeugs, wie die Geschwindigkeit, die auf 60% der auf dem jeweiligen Straßenabschnitt möglichen Geschwindigkeit begrenzt wurde, die Größe von 2,8×2 Meter (H×B) und das Gewicht von 5 Tonnen. Diese Parameter werden bei der Routenberechnung berück-

sichtigt, so dass ein Fahrzeug auch nur auf entsprechenden Strecken fahren kann, die keine räumlichen oder gewichtsspezifischen Einschränkungen haben. Die Größe der Fahrzeugflotte wird an den aktuellen Bedarf angepasst. Wenn die Transportnachfrage niedrig ist, werden nicht benötigte Fahrzeuge angewiesen zu dem Ausgangsdepot zurückzukehren, wohingegen bei steigender Nachfrage zusätzliche Fahrzeuge aus den Depots abgerufen werden können. Der Bedarf wird basierend auf der Länge der globalen Warteschlange festgestellt, die aus noch nicht abgeholten Fahrgästen bzw. aus solchen, die noch nicht in einer lokalen Reservierungsliste der Fahrzeuge aufgenommen worden sind, besteht.

Im Folgenden wird das unterstützende Verfahren mit einem ereignisbasierten Optimierungsmechanismus mit einer Variante ohne Kooperation verglichen. Der Radius der Suche nach geeigneten Fahrzeugen wurde in beiden Städten auf 3000 Meter beschränkt. Bei den Fahrzeugen wird das nächste Ziel lediglich auf Basis der Distanz zur jeweiligen Abhol- oder Zielposition bestimmt, sofern die maximale Fahrzeit der aktuellen Fahrgäste nicht überschritten ist. Die Zuordnung eines potenziellen Fahrgastes zu einem geeigneten Fahrzeug erfolgt durch den Server und basiert zu 70% auf der Entfernung zwischen Fahrgast und Fahrzeug und zu 30% auf der bereits verstrichenen Wartezeit des Fahrgastes. Zur Untersuchung des Optimierungspotenzials auf den realistischen Straßennetzen werden sowohl bei der Nutzung von DTNs als auch bei der Variante ohne Kooperation die gleichen, zuvor generierten, Fahrgastlisten verwendet. Im Gegensatz zu den Auftragslisten für den Warentransport, werden im Rahmen dieser Simulation, wie auch schon bei den initialen Experimenten (vgl. Abschnitt 5.3.3.1), Fahrgäste mit zufälligen Start- und Zielpunkten erzeugt, die im Gebiet des verwendeten Straßennetzes liegen. Dabei wurden mindestens 10 unterschiedliche Fahrgastlisten mit 100, 200, 400, und 800 Fahrgästen erzeugt und bei jedem Simulationslauf mit und ohne die Optimierungsphase zuvor eingelesen. Der Zeitraum, in dem die Fahrgäste in gleichen Intervallen der Simulationsumgebung hinzugefügt werden, beträgt in diesem Fall 4,5 Stunden. Damit erscheint ein Fahrgast bei der Instanz mit 100 Fahrgästen alle 162 Sekunden und bei 800 Fahrgästen alle 20 Sekunden. Die minimale Distanz zwischen den Start- und Zielpunkten der Fahrgäste für alle Instanzen liegt im Schnitt zwischen 4,25 und 4,35 Kilometer für Barcelona und zwischen 5,75 und 5,94 Kilometer für München. Die jeweilige Standardabweichung der durchschnittlichen, minimalen Strecke zwischen Start- und Zielpunkt liegt zwischen 1,93 und 2,01 Kilometer in Barcelona und 2,60 und 2,66 Kilometer in München, wie aus Tabelle 5.4 ersichtlich. Dabei liegt die größte minimale Distanz in Barcelona bei fast 12 Kilometern und in München bei rund 17 Kilometern.

Die Größe der Fahrzeugflotte wird abhängig vom Bedarf angepasst, wobei die Simulation mit 0 Fahrzeugen startet. Hierbei wird alle 16 Sekunden überprüft, ob die Anzahl der wartenden Fahrgäste größer ist als die Hälfte der Anzahl aktiver Fahrzeuge. Ist dies bei zwei aufeinanderfolgenden Überprüfungen der Fall, wird ein Fahrzeug hinzugefügt. Somit steigt die Anzahl der Fahrzeuge maximal alle 32 Sekunden um ein Fahrzeug. Ist dagegen bei drei Überprüfungen die Anzahl wartender Fahrgäste kleiner als ein Drittel der aktiven Fahrzeuge, wird ein Fahrzeug aus der Flotte entfernt und angewiesen in das Ausgangsdepot zurückzukehren, wodurch dieses Fahrzeug nicht mehr zu den aktiven Fahrzeugen zählt. Sämtliche durch die Simulation gewonnenen Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 aufgeführt, wobei im Folgenden auf einige Details eingegangen wird.

Fahrgastinstanzen	100	200	400	600	800
Durchschnittliche minimale Distanz der Fahrgäste [m]					
Barcelona	4.345	4.281	4.250	4.275	4.272
Standardabweichung	2.009	1.997	1.928	1.983	1.981
München	5.747	5.920	5.909	5.942	5.928
Standardabweichung	2.611	2.662	2.599	2.613	2.642
Durchschnittliche zurückgelegte Distanz der Fahrgäste [m]					
Barcelona (NoDTN)	9.270	10.544	10.397	10.557	10.531
Standardabweichung	9.966	10.832	10.625	10.266	10.992
Barcelona (DTN)	9.196	10.321	10.220	10.368	10.396
Standardabweichung	9.232	9.512	9.373	9.213	9.482
München (NoDTN)	13.724	14.100	14.130	14.420	14.636
Standardabweichung	12.988	12.295	12.735	12.838	12.949
München (DTN)	13.558	13.913	13.828	14.156	14.277
Standardabweichung	12.194	11.743	11.851	11.394	11.500
Durchschnittliche (Maximale) Anzahl der Fahrzeuge					
Barcelona (NoDTN)	4,6 (6,5)	8,4 (12,3)	15,3 (23,4)	22,6 (35,1)	29,9 (46,1)
Barcelona (DTN)	4,5 (7,3)	8,1 (12,9)	14,9 (24,7)	21,9 (37,3)	28,6 (48,1)
München (NoDTN)	6,1 (8,9)	11,0 (17,3)	18,7 (32,9)	26,3 (48,5)	33,0 (63,7)
München (DTN)	6,0 (9,8)	10,9 (18,5)	18,5 (34,1)	26,2 (52,8)	33,7 (68,0)
Durchschnittlich zurückgelegte Distanz aller Fahrzeuge [km]					
Barcelona (NoDTN)	632,416	1.253,507	2.422,640	3.601,080	4.777,553
Barcelona (DTN)	635,043	1.229,417	2.381,968	3.526,814	4.598,465
München (NoDTN)	832,878	1.674,555	3.222,861	4.769,640	6.356,584
München (DTN)	847,762	1.658,280	3.191,752	4.691,022	6.113,768
Durchschnittliche Fahrzeugwechsel (DTN)					
0 (Barcelona)	96,66%	93,93%	88,83%	86,30%	84,69%
1 (Barcelona)	3,27%	5,93%	10,89%	12,85%	14,31%
2 (Barcelona)	0,13%	0,13%	0,28%	0,80%	0,97%
3+ (Barcelona)	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,03%
0 (München)	96,13%	93,27%	87,25%	83,79%	82,48%
1 (München)	3,81%	6,69%	12,28%	15,58%	16,65%
2 (München)	0,06%	0,04%	0,42%	0,63%	0,87%
3+ (München)	0,00%	0,00%	0,05%	0,00%	0,00%

Tabelle 5.4: Simulationsergebnisse für die Städte Barcelona und München ohne (NoDTN) und mit (DTN) Optimierung

Abbildung 5.34 zeigt die Ergebnisse der notwendigen bzw. durchgeführten Fahrzeugwechsel. Dabei wurden bei der Instanz von 100 Fahrgästen in beiden Städten rund 96% der Fahrgäste direkt zum Ziel transportiert, so dass der Grad der Optimierung lediglich bei 4% lag. Mit steigendem Fahrgastaufkommen sank die Zahl der direkten Transporte auf 84,7% in Barcelona und 82,5% in München. Bei den Instanzen von 800 Fahrgästen wurde ein Fahrzeugwechsel von 14,4% der Fahrgäste in Barcelona und 16,7% der Fahrgäste in München durchgeführt. Zwei oder mehr Fahrzeugwechsel wurden in beiden Städten lediglich von unter 1% der Fahrgäste vollzogen. Im Vergleich zu den initialen Experimenten liegen diese Zahlen bei der Verwendung realistischer Straßennetze damit deutlich unter denen einer einfachen Gitterstruktur. Ansonsten zeigt sich allerdings ein ähnliches Bild, so dass der Grad der Optimierung mit steigendem

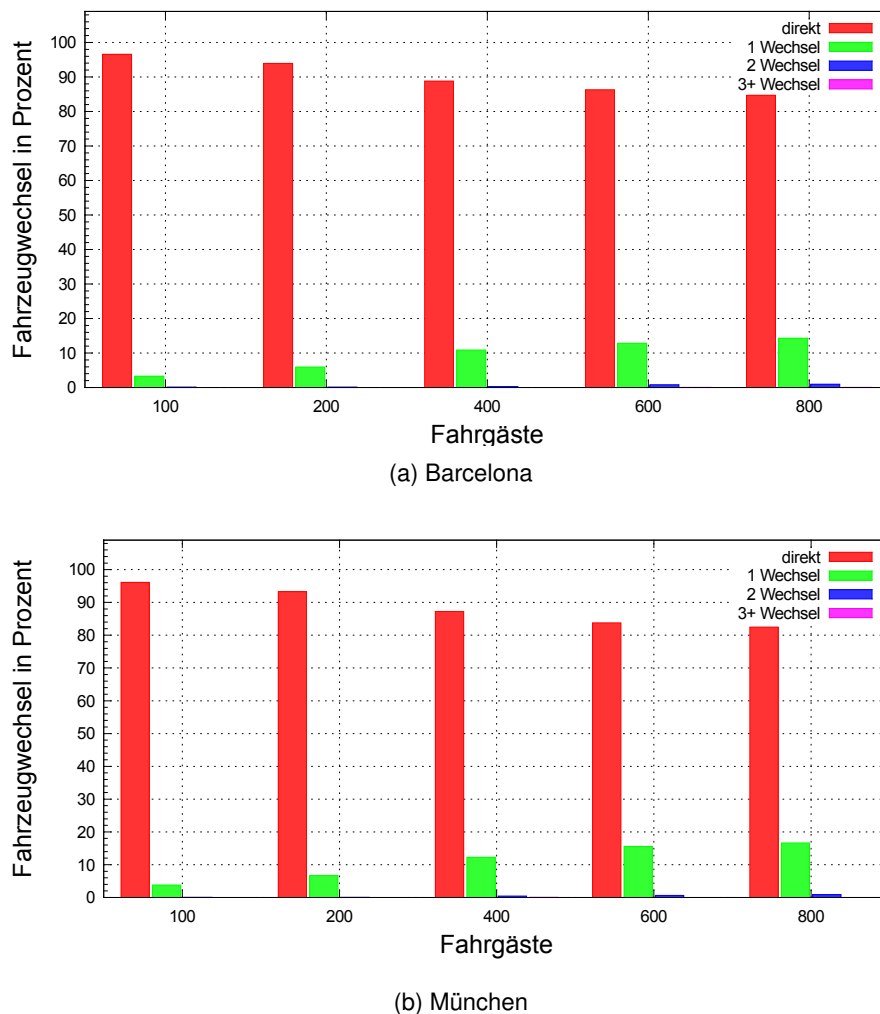
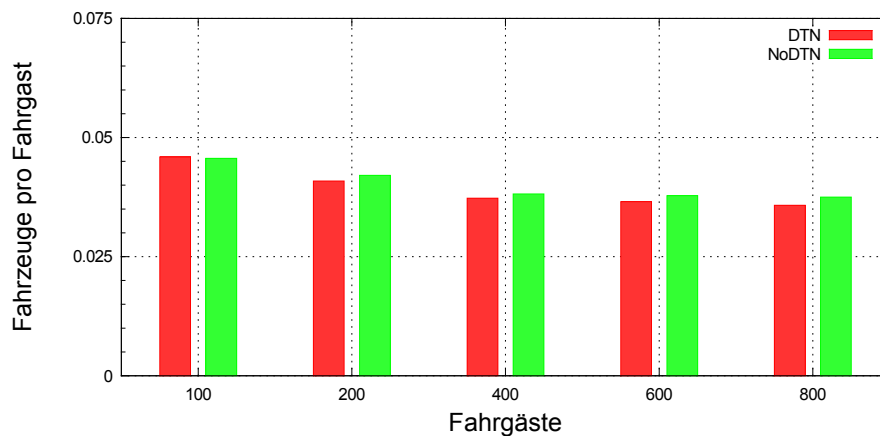


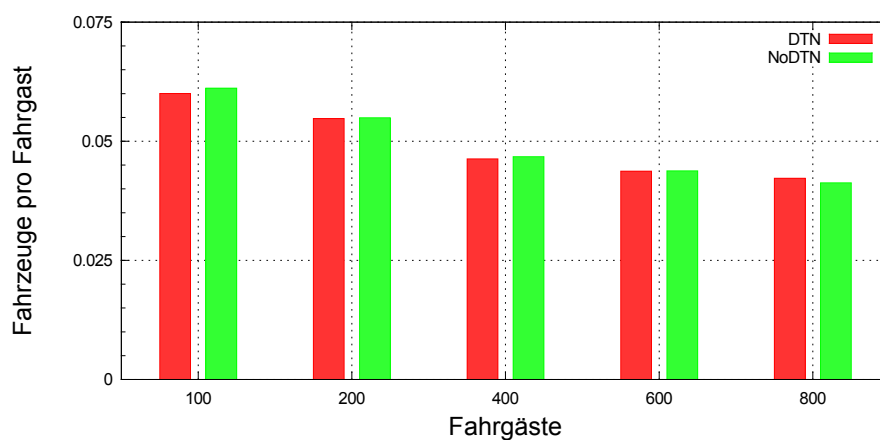
Abbildung 5.34: Anzahl der Fahrzeugwechsel für Barcelona und München

Fahrgastaufkommen ebenfalls zunimmt. Auch wenn die Zahlen der beiden Städte auf keine signifikanten Abweichungen hindeuten, lässt sich auf Basis der Ergebnisse im Zusammenhang mit den Straßennetzmorphologien festhalten, dass Stern-Ring-Strukturen einen höheren Grad der Optimierung erlauben als Gitterstrukturen.

Mit Bezug auf die Fahrzeugotte deuten die Ergebnisse für beide Städte auf einen unterproportionalen Anstieg im Vergleich zum Fahrgastaufkommen hin, wie in Abbildung 5.35 dargestellt. Im Gegensatz zu den initialen Experimenten werden sowohl bei der Nutzung von DTNs als auch ohne den Einsatz der Kooperation durchschnittlich annähernd gleich viele Fahrzeuge benötigt. Bei einer Instanz von 100 Fahrgästen wurden in Barcelona durchschnittlich 22 Fahrgäste von einem Fahrzeug transportiert. Diese Zahl steigt unter Verwendung der Optimierung bei 800 Fahrgästen auf 27,9 Fahrgäste pro Fahrzeug an, wohingegen ohne die Optimierung 26,7 Fahrgäste von einem Fahrzeug transportiert wurden. Die Nutzung von DTNs führte in Barcelona somit zu einem Anstieg der Auslastung der Fahrzeuge um 4,3% und deutet somit auf eine entsprechende Effizienzsteigerung hin. In München steigt die Zahl der benötigten Fahrzeuge auf Grund der größeren Fläche an, so dass bei der Instanz von 100 Fahrgästen rund 16 Fahrgäste von einem Fahrzeug transportiert wurden. Zwar



(a) Barcelona

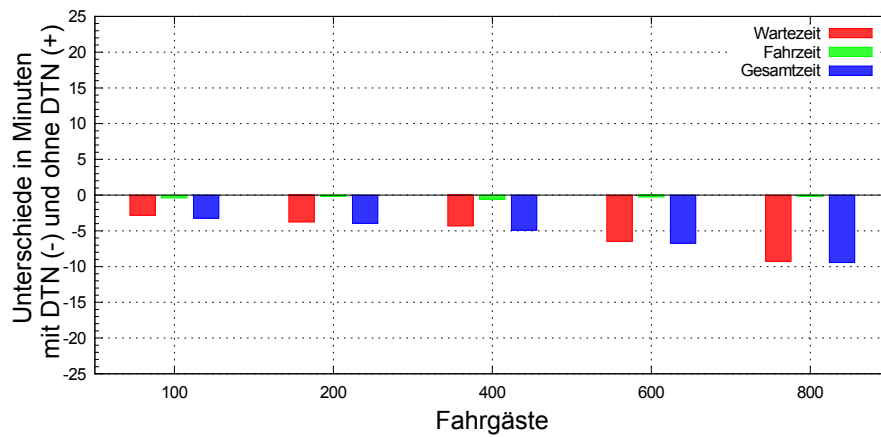


(b) München

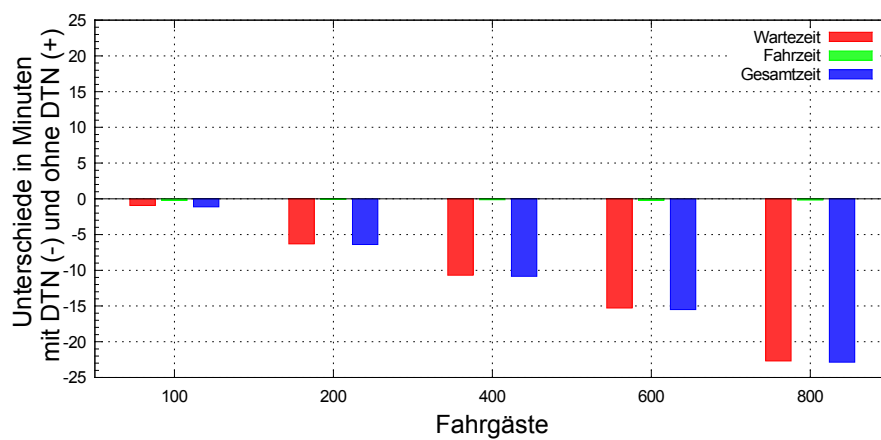
Abbildung 5.35: Fahrzeugeinsatz pro Fahrgast für Barcelona und München

steigt hierbei ebenfalls die Auslastung der Fahrzeuge mit steigendem Fahrgastaufkommen auf rund 24 Fahrgäste pro Fahrzeug an, führt aber zu keinem signifikanten Unterschied bezüglich der Nutzung von DTNs. Im Hinblick auf den Grad der Optimierung bezüglich der Fahrzeugwechsel zeigt sich bei der Fahrzeugnutzung, dass der Einsatz von DTNs bei der Gitterstruktur Barcelonas zu einer Reduzierung der durchschnittlich benötigten Fahrzeuge führt. Im Gegensatz dazu deuten die Ergebnisse bei der Stern-Ring-Struktur in München nicht auf einen geringeren Fahrzeugeinsatz hin. Unter Berücksichtigung der von allen Fahrzeugen zurückgelegten Distanzen ergibt sich unter Verwendung der Optimierung eine Einsparung von bis zu 3,7% in Barcelona und entspricht bei der Instanz von 800 Fahrgästen ca. 180 Kilometer. In München ist die prozentuale Einsparung mit 3,8% vergleichbar, wobei auf Grund der größeren Fläche rund 243 Kilometer bei 800 Fahrgästen eingespart werden konnten.

Im Vergleich zu den bisher betrachteten Parametern ergeben sich bei den Zeiten deutlichere Unterschiede. Die relativen Werte der Warte-, Fahr- und Gesamtzeiten der Fahrgäste für beide Städte sind in Abbildung 5.36 dargestellt. Allerdings zeigt sich, dass im Vergleich zu den initialen Experimenten mit einer dynamischen Flotte nicht die Fahrzeit zu einer Verbesserung führt, sondern bei realistischen Straßennetzen der Einfluss der Wartezeit ausschlaggebend



(a) Barcelona



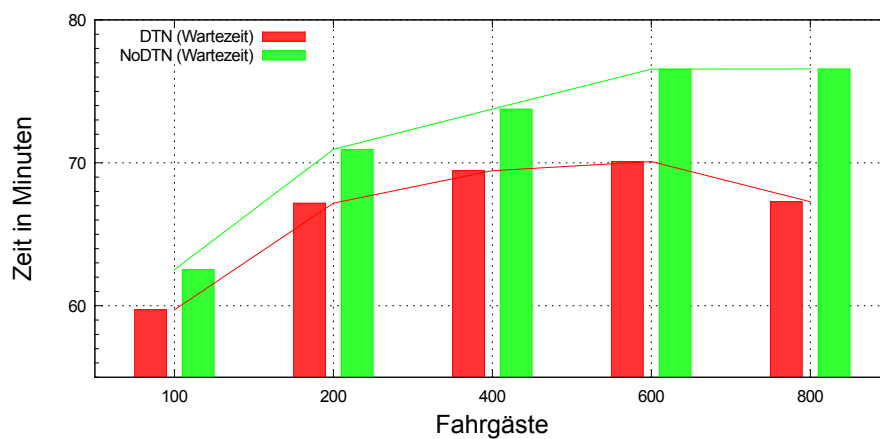
(b) München

Abbildung 5.36: Relative Veränderung der Zeiten für Barcelona und München

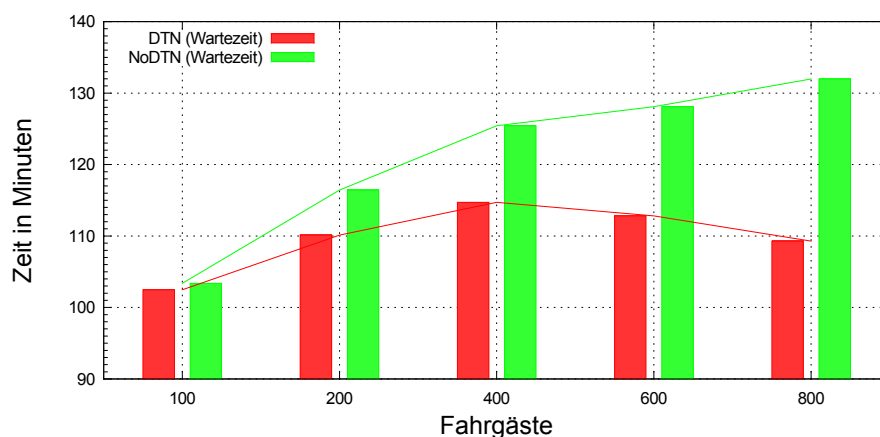
für die Reduzierung der Gesamtzeit ist. Bezüglich der Fahrzeit ergeben bei beiden Städten und unabhängig vom Einsatz des DTN Prinzips lediglich minimale Unterschiede. In absoluten Zahlen beträgt diese über alle Instanzen durchschnittlich rund 32 Minuten in Barcelona und 55 Minuten in München. Im Mittel liegt die von den Fahrgästen tatsächlich zurückgelegte Distanz zwischen Start und Ziel bei 10,2 Kilometern in Barcelona und 13,9 Kilometern in München und hat sich somit in beiden Städten um den Faktor 2,4 im Vergleich zur kürzesten möglichen Strecke verlängert. Im Vergleich der beiden Ansätze konnte mit der Verwendung von DTNs die Wartezeit in Barcelona um 4,5% bei 100 Fahrgästen und bis zu 12,1% bei 800 Fahrgästen reduziert werden. In München betrug die Reduzierung der Wartezeit bei 100 Fahrgästen zwar noch weniger als 1%, aber mit steigendem Fahrgastaufkommen wurde bei 800 Fahrgästen eine Verbesserung von über 17% im Vergleich zum Ansatz ohne Optimierung erreicht.

Bei der aktuellen Konfiguration des Systems für den bedarfsorientierten Transport liegen die absoluten Werte allerdings nicht in einem akzeptablen Bereich. Dabei liegen die absoluten Wartezeiten in Barcelona zwischen 60 und 70 Minuten und in München sogar zwischen 102 und 115 Minuten. Dies liegt einerseits daran, dass in einem Abstand von mindestens 32 Sekunden lediglich ein zusätzliches Fahrzeug der Simulationsumgebung hinzugefügt

wird und andererseits, dass die Routingstrategie der Fahrzeuge nicht auf eine Minimierung der Zeit, sondern mit dem kürzesten Weg auf die Minimierung der Distanz ausgelegt ist. Insbesondere bei der kürzesten Route hat die festgelegte Reduzierung der Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf 60% erhebliche Auswirkungen auf die Fahrzeit und schließlich auch auf die Abhol- bzw. Wartezeit der Fahrgäste, da hauptsächlich kleine Nebenstraßen mit entsprechenden Geschwindigkeitsbegrenzungen genutzt wurden. Der Verlauf der Wartezeiten über die simulierten Fahrgastinstanzen, der in Abbildung 5.37 dargestellt ist, zeigt allerdings, dass diese bei beiden Ansätzen zunächst ansteigt, wobei ab 600 Fahrgästen in Barcelona und bereits ab 400 Fahrgästen in München bei der Nutzung von DTNs wieder eine Reduzierung eintritt. Im Gegensatz dazu steigt die Wartezeit ohne die Nutzung der Optimierung in Barcelona bei größeren Instanzen weiter an und stagniert zwischen 600 und 800 Fahrgästen. Im Vergleich dazu zeigt der Verlauf für München weiterhin einen Anstieg der Wartezeit ohne den Einsatz der Optimierung.



(a) Barcelona



(b) München

Abbildung 5.37: Verlauf der absoluten Wartezeiten für Barcelona und München

Im Vergleich zu den initialen Experimenten auf der Basis einer Gitterstruktur ergibt sich beim Einsatz realistischer Straßennetze ein anderes Bild. Bei den durchgeführten Simulationen ist die Fahrzeit mit und ohne Optimierung vergleichbar, wohingegen die

Wartezeit reduziert werden konnte und somit zu besseren Gesamtzeiten führt. Dies ist mit der Beschränkung im Zusammenhang mit der maximalen Fahrzeit in Form der Distanz zu erklären, die oft überschritten wurde. Die Ergebnisse der Simulation auf realistischen Straßennetzen zeigen dennoch, dass durch den Einsatz von DTNs bereits bei einem relativ geringen Optimierungsgrad bezüglich der durchgeführten Fahrzeugwechsel neben der Einsparung der zurückgelegten Distanzen der Fahrzeuge auch eine Steigerung der Auslastung erreicht werden kann. Dieser Effekt verstärkt sich insbesondere bei größeren Fahrgastinstanzen und impliziert damit die Skalierbarkeit des Ansatzes, zumal die Anzahl der benötigten Fahrzeuge unterproportional zum Fahrgastaufkommen steigt. Bezüglich der Fahrzeiten konnten akzeptable Werte unter Berücksichtigung der dynamischen Anfragen und des geringen Fahrzeugeinsatzes erreicht werden. Trotz der verhältnismäßig hohen Wartezeiten kann die Nutzung von DTNs zu einer erheblichen Verbesserung im Vergleich zum Verfahren ohne Kooperation beitragen. Hierbei ist anzumerken, dass die sehr langen und daher inakzeptablen Wartezeiten auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen sind. Zunächst wurde keine Ablehnung ungünstiger Aufträge berücksichtigt, was zu einigen extremen Werten führte, die die durchschnittlichen Wartezeiten nach oben verzerrt haben. Eine Ablehnung einiger dieser Aufträge kann zu erheblichen Verbesserungen führen, wobei entsprechende Untersuchungen zur Verifikation in den nächsten Abschnitten durchgeführt werden. Ein weiterer Grund ist die gewählte Strategie zur Routenberechnung, bei der nicht die Zeit, sondern lediglich die Distanz ausschlaggebend für die Wegwahl der Fahrzeuge ist. Durch den Einsatz eines Verfahrens zur Berechnung der schnellsten Route erfolgt eine Optimierung nach der Zeit und wirkt sich somit reduzierend auf alle damit zusammenhängenden Kennzahlen aus. Einen weiteren Betrag leistete die nicht optimale Anpassung der Fahrzeugflotte an den aktuellen Bedarf. Das relativ langsame Hinzufügen zusätzlicher Fahrzeuge wirkte sich zwar positiv auf die Fahrzeugauslastung aus, hatte aber längere Wartezeiten zur Folge. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Straßennetzmorphologien lässt sich feststellen, dass eine Stern-Ring-Struktur einen höheren Grad der Optimierung bezüglich der vollzogenen Fahrzeugwechseln erlaubt. Bezogen auf die Fläche der untersuchten Gebiete, die in Barcelona im Vergleich zu München um rund 37% kleiner ist, wurden bei der Instanz von 800 Fahrgästen durchschnittlich nur 15% weniger Fahrzeuge benötigt. Im Verhältnis kann demnach bei einer Stern-Ring-Struktur ein größeres Gebiet mit weniger Fahrzeugen abgedeckt werden, wobei sich die beobachteten Zeiten annähernd proportional zur Fläche verhalten. Bei den insgesamt zurückgelegten Distanzen der Fahrzeuge deuten die Ergebnisse auf eine Verringerung des Einsparungspotenzials im Vergleich zu den initialen Experimenten hin. Im Fall von 800 Fahrgästen lag die Distanzeinsparung in beiden Städten bei ca. 3,8%. Im Vergleich der Städte untereinander ergibt sich allerdings unter Berücksichtigung der Größe des Gebiets ein höheres Einsparungspotenzial bei der Gitterstruktur Barcelonas.

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich, basierend auf den gewonnen Erkenntnissen, mit der Analyse unterschiedlicher Parameterkonfigurationen, die zur Auswahl des nächsten Ziels bzw. zur Selektion potenzieller Fahrgäste verwendet werden. Hierbei werden unter anderem auch entsprechende Anpassungen bezüglich der Strategie zur Routenberechnung und einer stärkeren Bedarfsorientierung vorgenommen. Im Fokus der Untersuchung liegt der

Effekt unterschiedlicher Gewichtungskonfigurationen und deren Einfluss auf die wesentlichen Kennzahlen.

5.3.3.4 Analyse unterschiedlicher Gewichtungskonfigurationen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Untersuchung unterschiedlicher Optimierungsparameter und dem Effekt auf Fahr- und Wartezeiten sowie die Auswirkungen auf den Grad der Optimierung und die Fahrzeugnutzung. Im Wesentlichen wurden hierbei unterschiedliche Gewichtungen für die Formeln 4.3 und 4.4 aus Abschnitt 4.3.3.2 analysiert. In diesem Zusammenhang wurde das verteilte Verfahren für den Einsatz von DTNs genutzt, wobei die Kooperationsreichweite der Fahrzeuge auf einen Radius von 1.000 Meter begrenzt wurde. Auf Grund der verhältnismäßig geringen Distanz zur Suche potenzieller Kooperationspartner wurde der periodische Mechanismus zur Optimierung eingesetzt, bei dem ein Intervall von 10 Minuten gewählt wurde. Basierend auf den Ergebnissen des letzten Abschnitts wurde hierbei nicht nach der Distanz, sondern nach der Zeit zum Zurücklegen der Strecke optimiert und dementsprechend eine Metrik zur Berechnung der schnellsten Route verwendet. Des Weiteren diente das Straßennetz Münchens als Basis der Simulationsumgebung, wobei in diesem Fall die Anzahl der Depots von 9 auf 16 erhöht wurde. Neben den Bussen mit einer Kapazität von 10 Personen kommen bei den folgenden Simulationsläufen auch Taxen für den dezidierten Transport von Fahrgästen zum Einsatz. Dabei besteht die Möglichkeit einer Kooperation zwischen den unterschiedlichen Fahrzeugtypen, bei dem ein Taxi seinen Fahrgast zu einem Bus befördert, dessen Ablieferungspositionen der aktiven Fahrgäste in der Nähe des im Taxi befindlichen Fahrgastes liegen. Allerdings wird diese Art der Kooperation im Folgenden nicht berücksichtigt und somit repräsentiert der Einsatz eines Taxis einen abgelehnten Transportauftrag. Eine Ablehnung eines Transportauftrags erfolgt, wenn die Wartezeit des jeweiligen Fahrgastes 50 Minuten übersteigt. Ist diese Grenze der maximalen Wartezeit überschritten, wird der entsprechende Fahrgast aus der verteilt verwalteten Liste der wartenden Fahrgäste entfernt und somit nicht mehr von einem Bus abgeholt, selbst wenn sich ein solcher in der Nähe befinden sollte. Dafür wird der wartende Fahrgast in die globale Liste der Reservierungen aufgenommen, die von den Taxen verwaltet wird. Die initiale Kommunikationsreichweite einer Fahrgastanfrage wurde, wie auch die Kooperationsreichweite der Fahrzeuge, auf 1.000 Meter begrenzt. Allerdings wurde der Radius im Abstand von 48 Sekunden bzw. alle 6 Simulationsschritte um 500 Meter erhöht. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass eine Anfrage in endlicher Zeit ein Fahrzeug erreicht und der wartende Fahrgast in die globale Reservierungsliste aufgenommen wird. Für den praktischen Einsatz und im Hinblick auf die derzeitige Verbreitung der C2C, C2I bzw. C2X Technologie bietet sich für den Austausch der zur Kooperation nötigen Informationen insbesondere die 4. Generation der Mobilfunknetze an.

Erste Untersuchungen zeigten, dass ab einer Anzahl von 400 Fahrgästen pro Stunde sehr oft die Bedingung bezüglich der maximalen Distanz bzw. Fahrzeit überschritten wurde. Dies hatte unter Berücksichtigung der Formel 4.6 für die Zielauswahl zur Folge, dass das nächste Ziel lediglich aus den aktuellen Fahrgästen gewählt wurde, deren individuelle Fahrzeit überschritten wurde. Um den Effekt auf die Fahrzeit durch unterschiedliche Gewichtungskonfiguration besser beobachten zu können, wurde im Rahmen der folgenden

Simulationen die Bedingung der maximalen Fahrdistanz bzw. -zeit aus der genannten Formel abgeschwächt. Demzufolge werden ausschließlich aktive Fahrgäste befördert, sofern der Anteil der Fahrgäste mit überschrittener maximaler Fahrzeit einen Wert von mehr als 20% erreicht. Hierbei erfolgt die Auswahl allerdings nicht nur aus diesen Fahrgästen sondern aus allen aktiven Fahrgästen. Auf diese Weise können auch Fahrgäste, deren Ablieferungspositionen auf dem Weg zum Ziel eines Fahrgastes mit überschrittener Fahrzeit liegt, vorher abgeliefert werden. Dadurch wird verhindert, dass gegebenenfalls günstigere Ablieferungspositionen wegen einem einzelnen Fahrgast mit überschrittener Fahrzeit zurückgestellt werden. In diesem Fall wurde als Schwellwert das doppelte der Fahrzeit für die schnellste Route von der Abholposition zur Ablieferungsposition angenommen.

Im Hinblick auf die dynamische Fahrzeugotte wird davon ausgegangen, dass zunächst jedes Depot mit 2 aktiven Bussen besetzt ist, die auf eingehende Anfragen reagieren. Im Gegensatz zu den Simulationen aus dem vorigen Abschnitt wurde auch die Überprüfung des Bedarfs in kürzeren Zeitabständen durchgeführt, um gegebenenfalls zusätzliche Fahrzeuge abzurufen oder zurückzurufen. Im Rahmen dieser Simulationen wurden für jede Instanz von 100, 200, 400 und 600 Fahrgästen entsprechende Listen mit zufälligen Abhol- bzw. Ablieferungspositionen erzeugt. Allerdings wurde zur Simulation einer extremeren Anfragerate die Erscheinungszeit auf eine Stunde beschränkt, so dass bei der Instanz von 100 Fahrgästen alle 36 Sekunden ein neuer Fahrgast eine neue Transportanfrage stellt. Bei einer Instanz von 600 Fahrgästen beträgt das Intervall neuer Transportanfragen lediglich 6 Sekunden. Die untersuchten Gewichtungsfaktoren für einen aktiven Fahrgast $\omega(F)$ beziehen auf die Fahrzeit zwischen dem Fahrzeug und dem Ziel des Fahrgastes t^z , die Wartezeit des aktuellen Fahrgastes t^w und die aktuelle Fahrzeit t^d . Die Gewichtungsfaktoren eines wartenden Fahrgast in Form einer Reservierung $\omega(R)$ beziehen sich auf die Fahrzeit von der aktuellen Position des Fahrzeug zur Abholposition t^a und die aktuelle Wartezeit t^w :

- Gewichtungsfaktoren eines Fahrgastes: $\omega(F) = (t^z \ t^w \ t^d)$
- Gewichtungsfaktoren einer Reservierung: $\omega(R) = (t^a \ t^w)$

Für Fahrgäste wurden dabei die drei folgenden Gewichtungskonfiguration untersucht:

1. $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$: Bei dieser Konfiguration wird zu gleichen Teilen die Fahrzeit zur Zielposition und die bereits verstrichene Fahrzeit berücksichtigt. Somit sollen Fahrgäste die sich bereits länger im Fahrzeug befinden stärker gewichtet werden als diejenigen, die bisher weniger Zeit im Fahrzeug verbracht haben, falls die Zeiten zu den jeweiligen Zielpositionen etwa gleich sind.
2. $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$: Hiermit soll neben der Fahrzeit zur Zielposition mit 50% sowohl die Wartezeit des aktuellen Fahrgastes mit 25% als auch die bisherige Fahrzeit zu 25% gewichtet werden. Bezüglich der Wartezeit sollen Fahrgäste stärker gewichtet werden, die bereits verhältnismäßig lange bis zur Abholung gewartet haben, um dadurch die Gesamtreisezeit zu minimieren.
3. $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$: Diese Konfiguration wurde auch schon bei den Simulationen in den letzten Abschnitten verwendet, wobei lediglich eine geringe Fahrzeit bis zur Zielposition ausschlaggebend ist. Die Warte- und bisherige Fahrzeit werden hierbei nicht berücksichtigt.

Für Reservierungen werden ebenfalls drei Gewichtungskonfiguration verwendet:

1. $\omega(R) = (0,5 \quad 0,5)$: Bei dieser Konfiguration werden die bisherige Wartezeit und die Fahrzeit zwischen dem wartenden Fahrgast und dem Fahrzeug zu gleichen Teilen gewichtet. Dadurch haben potenzielle Fahrgäste, deren Abholposition in kurzer Zeit erreicht werden kann und die nur eine verhältnismäßig geringe Wartezeit aufweisen, etwa die gleiche Priorität, wie solche, deren Abholposition zwar nicht so schnell erreicht werden kann und bereits eine längere Zeit gewartet haben. Diese Gewichtung ähnelt damit denen, aus den vorangegangenen Abschnitten, wobei auf Grund der Routingstrategie die Distanz anstelle der Fahrzeit zur jeweiligen Position zu 70% und die Wartezeit zu 30% berücksichtigt wurden.
2. $\omega(R) = (1 \quad 0)$: Diese Konfiguration berücksichtigt lediglich die Fahrzeit zum Erreichen der Abholposition eines wartenden Fahrgastes.
3. $\omega(R) = (0 \quad 1)$: Hiermit soll die Entscheidung über die Abholung eines potenziellen Fahrgastes ausschließlich auf der bereits verstrichenen Wartezeit getroffen werden, wodurch diese verkürzt werden soll.

Basierend auf diesen Konfigurationen ergeben sich insgesamt 9 unterschiedliche Kombinationen, deren Ergebnisse und Auswirkungen auf die beobachteten Kenngrößen im Folgenden vorgestellt werden. Die Ergebnisse deuten dabei auf eine stärkere Signifikanz der Reservierungskonfigurationen hin, weshalb diese zur Gruppierung der Kombinationen verwendet wurden.

Der Grad der Optimierung im Sinne der durchgeführten Fahrzeugwechsel ist für die unterschiedlichen Varianten der Optimierungsparameter in Abbildung 5.38 dargestellt. Auf

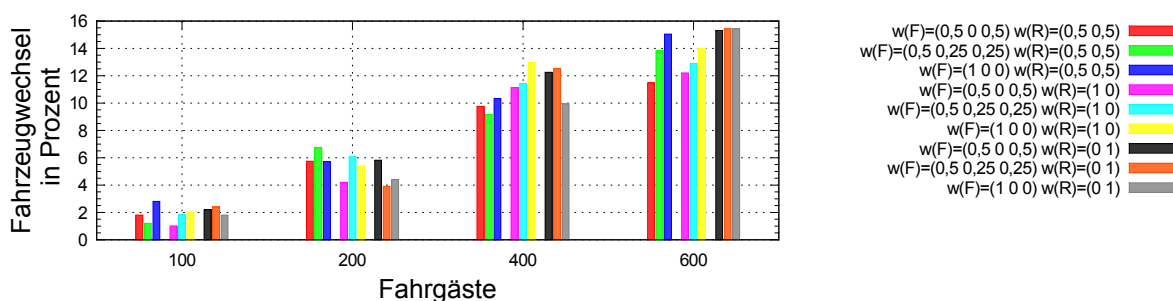


Abbildung 5.38: Vergleich eines Fahrzeugwechsels für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen

Grund der geringen Werte für zwei oder mehr Fahrzeugwechsel von unter 2% bei 600 Fahrgästen sind hierbei wegen der Übersichtlichkeit lediglich einmalige Fahrzeugwechsel aufgezeichnet, wobei die Berücksichtigung von 2 oder mehr Fahrzeugwechseln einen entsprechend höheren Grad der Optimierung zur Folge hat. Insgesamt bewegt sich die Anzahl von durchschnittlich einem Fahrzeugwechsel bei dieser Analyse im Vergleich zu den Werten des vorigen Abschnitts auf einem vergleichbaren Niveau.

Bei einer Reservierungskonfiguration von $\omega(R) = (0,5 \quad 0,5)$ steigt der Grad der Optimierung bis 200 Fahrgäste zunächst am stärksten an und verhält sich bei darüberliegenden Instanzen moderater. Allerdings ergeben sich insbesondere bei der Instanz von 600 Fahrgästen deutliche Unterschiede. Wird ausschließlich die Fahrzeit zur Ablieferungsposition eines

Fahrgastes berücksichtigt, so nimmt der Grad einen Wert von 15% an, wohingegen bei einer ausgeglichenen Gewichtungskonfiguration für Fahrgäste der Wert bei rund 11% liegt. In der Gruppe mit $\omega(R) = (1 \ 0)$ weist die generelle Entwicklung bei stärkerem Fahrgastaufkommen eine zur vorigen Gruppe vergleichbare Tendenz auf. Dabei steigt der Grad der Optimierung bei geringen Fahrgastinstanzen zunächst stärker an, wobei die Zunahme ab 400 Fahrgästen geringer im Vergleich zu den anderen Gruppen ausfällt. Bei 600 Fahrgästen ergibt sich die gleiche Reihenfolge, wobei in diesem Fall Werte zwischen 12% und 14% erreicht werden. Bei der letzten Gruppe mit einer Reservierungskonfiguration von $\omega(R) = (0 \ 1)$ und bei geringem Aufkommen ergibt sich bei $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$ und $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ bei 200 Fahrgästen und mit $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ bei 400 zunächst ein schwächerer Anstieg. Bei starkem Fahrgastaufkommen erreichen allerdings alle Konfigurationen dieser Gruppe einen Grad von mehr als 15%. Die größte Bandbreite an Einussmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Anzahl von Fahrzeugwechseln bietet anhand dieser Simulationsergebnisse eine ausgeglichene Gewichtungskonfiguration der Reservierungen, bei der sowohl die Zeit bis zur Abholposition als auch die bisherige Wartezeit berücksichtigt wird.

Neben Bussen werden in diesen Simulationsläufen auch Taxen eingesetzt. Hierbei lassen sich die Zeiten der von Taxen transportierten Fahrgäste entweder berücksichtigen, sofern alle beteiligten Fahrzeuge dem Transportsystem zugeschrieben werden, oder diese lassen nicht in die Ergebnisse mit ein, wenn die Überschreitung der maximalen Wartezeit eine Ablehnung repräsentiert. Das Verhältnis der benötigten Fahrzeuge pro Fahrgast ist in Abbildungen 5.39 dargestellt. Dabei lässt sich festhalten, dass bei allen Konfigurationen mit steigendem

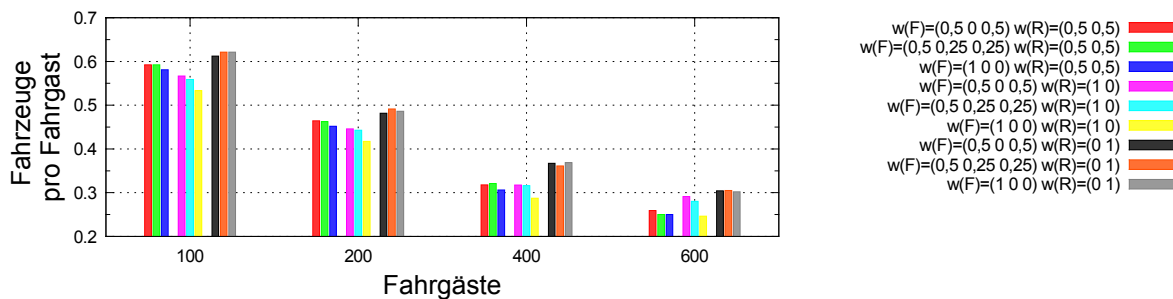


Abbildung 5.39: Verhältnis der Busse pro Fahrgast für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen

Fahrgastaufkommen eine bessere Fahrzeugauslastung und damit ein unterproportionaler Anstieg der benötigten Fahrzeuge durch die Optimierung erreicht wird. Die Auslastung ist allerdings deutlich geringer als bei den Untersuchungen des vorigen Abschnitts. Dies ist einerseits auf die deutlich kürzere Zeitspanne von einer Stunde, innerhalb der die Aufträge der Simulationsumgebung bekannt sind und zum anderen auf die kürzeren Intervalle zur Bedarfsüberprüfung, bei der zusätzliche Fahrzeuge schneller hinzugefügt wurden, zurückzuführen. Die unterschiedlichen Konfigurationen der Gruppe mit $\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$ zeichnen sich dabei durch einen ähnlichen Verlauf aus, wobei mit den Fahrgastkonfigurationen $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$ und $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ bei 600 Fahrgästen innerhalb einer Stunde eine etwas bessere Auslastung zu beobachten ist. Die Konfigurationen dieser Gruppe ermöglichen im Vergleich zu den anderen beiden Gruppen die beste Fahrzeugauslastung.

Wird anstelle der ausgeglichenen Reservierungskonfiguration ausschließlich die Zeit zum Erreichen der Abholposition mit $\omega(R) = (1 \ 0)$ berücksichtigt, so ergibt sich bezüglich der Fahrzeugauslastung die größte Variabilität im Vergleich zu den anderen Gruppen. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass die Kombination mit der Fahrgastkonfiguration $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ über alle Instanzen und Gruppen zur besten Fahrzeugnutzung führt. Bei der dritten Gruppe mit einer Reservierungskonfiguration von $\omega(R) = (0 \ 1)$ wird ausschließlich die bisherige Wartezeit unabhängig von der tatsächlichen Entfernung zur Abholposition berücksichtigt. Da die Reservierungen allerdings nur aus der lokalen Reservierungsliste stammen, ist davon auszugehen, dass sich die potenziellen Fahrgäste auch in der Umgebung des Fahrzeugs befinden oder zumindest befunden haben. Allerdings deuten die Ergebnisse dieser Konfiguration auf die schlechteste Auslastung der Fahrzeuge hin, wobei in diesen Fällen kein signifikanter Einfluss der Fahrgastgewichtung erkennbar ist.

Das Verhältnis der Fahrzeuge pro Fahrgast spiegelt sich auch in den Distanzen wieder. Die Distanzen, die pro Fahrzeug zurückgelegt wurden, sind in Abbildung 5.40 dargestellt. Dabei steigen die Distanzen ebenfalls unterproportional zum Fahrgastaufkommen, wobei sich

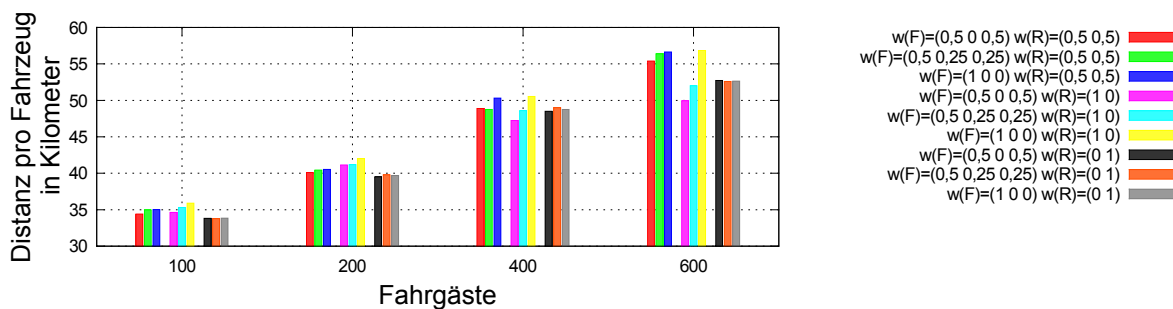


Abbildung 5.40: Vergleich der Distanz pro Bus für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen

innerhalb der Gruppen mit den Konfigurationen $\omega(R) = (0 \ 1)$ und $\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$ kaum signifikante Unterschiede ergeben. Bei der Gruppe mit der Konfiguration $\omega(R) = (1 \ 0)$ zeigt sich dagegen deutlich, dass bei einem schlechteren Fahrzeug zu Fahrgast Verhältnis, das zu einem verstärkten Fahrzeugeinsatz führt, durchschnittlich weniger Strecke von den beteiligten Fahrzeugen zurückgelegt werden muss. Bei den Fahrgastkonfigurationen $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$ und $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$, die innerhalb dieser Gruppe zu einem geringeren Fahrzeugbedarf führen, sind auch die Distanzen pro Fahrzeug am geringsten. Bemerkenswert ist hierbei, dass bei größeren Instanzen trotz der besseren Auslastung im Vergleich zur Gruppe mit $\omega(R) = (0 \ 1)$ eine geringere Distanz pro Fahrzeug zurückgelegt wurde. Im Gegensatz dazu bewegt sich die zurückgelegte Distanz pro Fahrzeug bei der Fahrgastkonfiguration $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ auf dem Niveau der Gruppe mit $\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$, wobei die der geringere Fahrzeugeinsatz auch zu einer höheren Distanz pro Fahrzeug führt.

Die prozentualen Anteile der abgelehnten Transportaufträge für die unterschiedlichen Instanzen und Konfigurationen sind in Abbildung 5.41 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass im Fall der ausgeglichenen Reservierungskonfiguration $\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$ über alle Instanzen deutlich weniger Aufträge auf Grund einer langen Wartezeit abgelehnt wurden. Der Anteil bei der Instanz von 600 Fahrgästen lag dabei unter 4%. Bei der Gruppe mit $\omega(R) = (1 \ 0)$

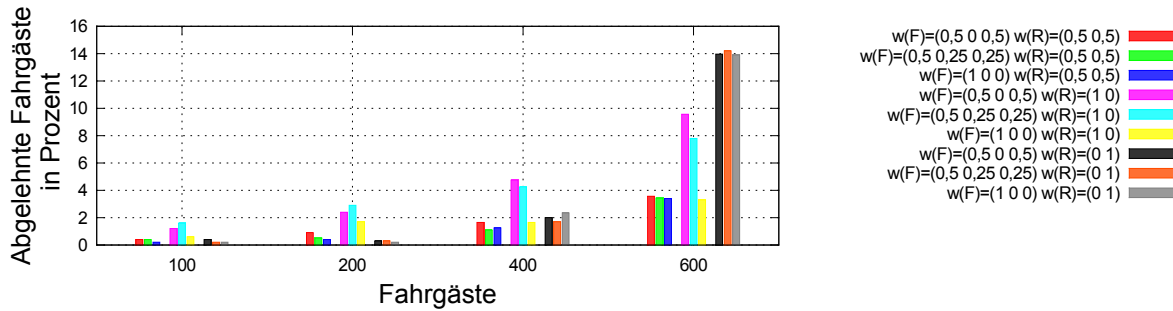


Abbildung 5.41: Abgelehnte Transportaufträge für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen

sticht die Kombination mit $\omega(F) = (1\ 0\ 0)$ besonders hervor. Hierbei ergibt sich eine mit der vorigen Gruppe vergleichbar geringe Anzahl von abgelehnten Aufträgen bei den größeren Instanzen. Die anderen Kombinationen dieser Gruppe nehmen auch bei niedrigem Fahrgastaufkommen verhältnismäßig hohe Werte an, wobei sich leichte Vorteile ergeben, wenn bei der Fahrgastkonfiguration neben der aktuellen Fahrzeit zusätzlich die Wartezeit bis zur Abholung berücksichtigt wird. Bei der letzten Gruppe mit $\omega(R) = (0\ 1)$ bewegt sich die Anzahl der Ablehnungen bis zu 400 Fahrgästen auf einem niedrigen Niveau, steigt dann aber sehr stark an und erreicht bei der Instanz von 600 Fahrgästen rund 14%. Unabhängig von der Fahrgastkonfiguration wird dabei der höchste Wert im Vergleich zu den anderen Gruppen erreicht und deutet damit überraschend auf eine schlechte Strategie zur Reduzierung der Wartezeit hin, obwohl diese das ausschlaggebende Kriterium darstellt. Zu erklären ist dies mit der unvorteilhaften Auswahl der Abholpositionen, bei der günstigere Optionen auf Grund der gegebenenfalls zu geringen Wartezeit nicht berücksichtigt werden und somit insgesamt zu durchschnittlich längeren Wartezeiten führt.

In Abbildung 5.42 sind die Ergebnisse der durchschnittlichen Fahrzeiten für die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten dargestellt. Im Vergleich zu den Untersuchungen des vo-

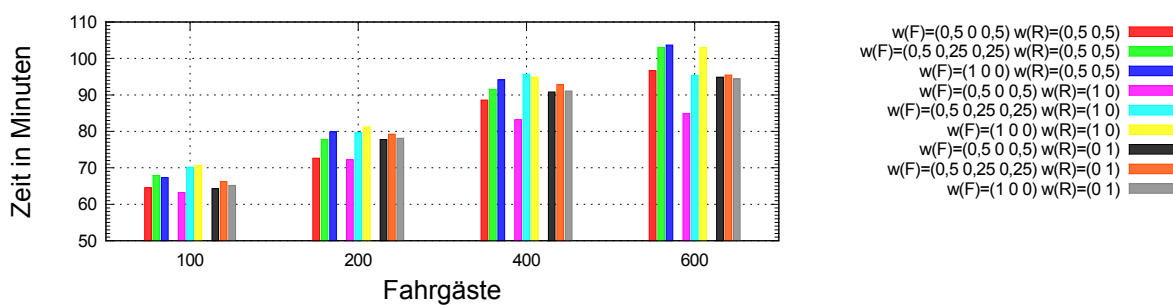


Abbildung 5.42: Vergleich der Fahrzeiten für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen

rigen Abschnitts wurde in diesem Fall die Bedingung bezüglich der maximalen Fahrzeit abgeschwächt, wodurch sich entsprechend längere Fahrzeiten ergeben. Hinzu kommt, dass im Rahmen dieser Untersuchung ein wesentlich stärkeres Fahrgastaufkommen simuliert wurde. Auf den Zeitraum des Bekanntwerdens bezogen entspricht die hier verwendete Instanz von 600 Fahrgästen einer Instanz von 2.700 Fahrgästen beim Vergleich zwischen Barcelona und

München. Anhand der vorliegenden Ergebnisse zeigt sich unter Berücksichtigung der Reservierungskonfiguration von $\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$, dass sich in Kombination mit $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ die längste Fahrzeit bei 600 Fahrgästen von durchschnittlich rund 104 Minuten ergibt. Wird in dieser Gruppe neben der Fahrzeit zur Ablieferungsposition zusätzlich die aktuelle Fahrzeit des Fahrgastes mit $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$ berücksichtigt, so kann die durchschnittliche Fahrzeit um über 6% reduziert werden und belegt damit den Ein- und den Ausschlag der entsprechenden Gewichtung. Wird neben der aktuellen Fahrzeit auch die Wartezeit des Fahrgastes mit einbezogen, so steigt auch die durchschnittliche Fahrzeit an und führt somit zu einer Abschwächung des Effekts. Eine stärkere Differenzierung ergibt sich bei der Gruppe mit $\omega(R) = (1 \ 0)$. In Kombination mit $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$ ermöglicht diese mit rund 85 Minuten die geringste durchschnittliche Fahrzeit bei 600 Fahrgästen. Die durchschnittliche Fahrzeit steigt, wie auch bei der vorigen Gruppe, durch die Hinzunahme der Wartezeit an, wobei in diesem Fall der Unterschied mit rund 11% deutlicher ausfällt. Sofern lediglich die Fahrzeit zur Ablieferungsposition ausschlaggebend ist, verlängert sich die Fahrzeit um 21% gegenüber der kürzesten beobachteten Fahrzeit. Im Vergleich dazu ist bei den Ergebnissen der Gruppe mit $\omega(R) = (0 \ 1)$ der geringste Anstieg der Fahrzeit zwischen 400 und 600 Fahrgästen im Vergleich zu den anderen Gruppen zu verzeichnen. Allerdings ist hierbei auch die Ablehnungsrate von Transportaufträgen am größten, die sich reduzierend auf die durchschnittliche Fahrzeit auswirkt. Innerhalb dieser Gruppe sind lediglich geringe Unterschiede zwischen den Fahrzeiten festzustellen, wobei die Kombination mit $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$ zu minimal schlechteren durchschnittlichen Fahrzeiten führt. Wird neben der Fahrzeit zur Ablieferungsposition auch die aktuelle Fahrzeit der Fahrgäste berücksichtigt, ergeben sich hinsichtlich der Gruppenzugehörigkeit jeweils die geringsten Fahrzeiten. Eine Ausnahme bildet hierbei die Gruppe, bei der ausschließlich die bereits verstrichene Wartezeit berücksichtigt wird und kein signifikanter Ein- und Ausschlag der Fahrgastkonfigurationen festgestellt wurde.

Die Ergebnisse der Wartezeiten für die unterschiedlichen Optimierungsparameter sind in Abbildung 5.43 zu sehen. Insgesamt kann, durch die im letzten Abschnitt beschriebenen

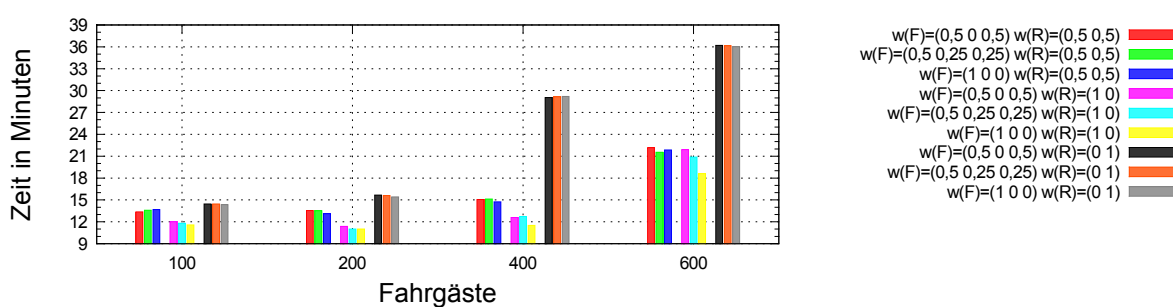


Abbildung 5.43: Vergleich der Wartezeiten für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen

und im Rahmen dieser Simulationen umgesetzten Maßnahmen, die Wartezeit mehr als deutlich reduziert werden. Diesbezüglich ergibt sich bei der Instanz von 600 Fahrgästen im schlechtesten Fall eine Reduzierung von über 60% der Wartezeit, wobei zu beachten ist, dass sich auch die Erscheinungsraten der Fahrgäste stark verkürzt haben und die Überprüfungsintervalle zur Erkennung des Bedarfs verkürzt wurden, wodurch auch die Anzahl der durchschnittlich

benötigten Fahrzeuge gestiegen ist. In der Gruppe mit der Reservierungskonfiguration $\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$ weisen die Ergebnisse der unterschiedlichen Kombinationen lediglich geringe Abweichungen auf und liegen bis zur Instanz mit 400 Fahrgästen zwischen 14 und 16 Minuten. Bei 600 Fahrgästen ist allerdings ein deutlicher Anstieg von rund 50% zu verzeichnen und erreicht dabei Werte zwischen 21 und 23 Minuten. Bei der Gruppe mit der Konfiguration $\omega(R) = (1 \ 0)$ ergeben sich durchschnittlich die kürzesten Wartezeiten, da in jedem Fall die am schnellsten zu erreichende Reservierung bedient wird. Bis zu 400 Fahrgästen liegen die Werte unter 13 Minuten, wobei auch in diesem Fall ein deutlicher Anstieg bei der Instanz von 600 Fahrgästen zu verzeichnen ist. Dennoch liegt bei der Kombination mit $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ die Wartezeit bei unter 20 Minuten. Die übrigen Kombinationen dieser Gruppe führen tendenziell zu rund 15% längeren Wartezeiten. Bereits die Anzahl der abgelehnten Transportaufträge deuteten auf lange durchschnittliche Wartezeiten bei der Gruppe mit $\omega(R) = (0 \ 1)$ hin. Wie den Ergebnissen zu entnehmen ist, erzielt die ausschließliche Berücksichtigung der Wartezeit einen gegenteiligen Effekt, so dass die Wartezeit im Vergleich zu den anderen Gruppen bei Instanzen ab 200 Fahrgästen deutlich ansteigt. Dies führt bei 600 Fahrgästen innerhalb einer Stunde zu Wartezeiten, die teilweise 36 Minuten übersteigen und somit für die Umsetzung eines flexiblen und bedarfsorientierten Transportsystems ungeeignet sind.

Gewichtungskonfiguration	Gesamtzeit [Minuten]	Wartezeit [Minuten]	Fahrzeit [Minuten]	Distanz aller Fahrzeuge [km]	Abgelehnte Fahrgäste [%]	1 Wechsel [%]
$\omega(R) = (0 \ 1)$, $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$	131,6	36,1	95,5	8.256	14,2	15,5
$\omega(R) = (0 \ 1)$, $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$	130,9	36,1	94,8	8.277	13,9	15,4
$\omega(R) = (0 \ 1)$, $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$	130,4	36,0	94,4	8.212	13,9	15,4
$\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$, $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$	125,6	21,9	103,7	8.213	3,4	12,1
$\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$, $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$	124,5	21,5	103,0	8.175	3,4	13,8
$\omega(R) = (1 \ 0)$, $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$	121,8	18,6	103,2	8.128	3,3	13,9
$\omega(R) = (0,5 \ 0,5)$, $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$	118,9	22,2	96,7	8.309	3,6	11,5
$\omega(R) = (1 \ 0)$, $\omega(F) = (0,5 \ 0,25 \ 0,25)$	116,3	20,9	95,4	8.061	7,8	12,8
$\omega(R) = (1 \ 0)$, $\omega(F) = (0,5 \ 0 \ 0,5)$	106,8	21,9	84,9	7.891	9,5	15,1

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Ergebnisse für 600 Fahrgäste mit unterschiedlichen Gewichtungskonfigurationen, Absteigend nach der Gesamtzeit

Die einzelnen Ergebnisse der durchgeführten Simulationen für die Instanz von 600 Fahrgästen sind in Tabelle 5.5 bezüglich der wesentlichen Kennwerte dargestellt. Zunächst lässt sich festhalten, dass mit der ausschließlichen Berücksichtigung der Wartezeit durch die entsprechende Reservierungskonfiguration ein gegenteiliger Effekt erzielt wird und unabhängig

von der Fahrgastkonfiguration zu den schlechtesten Gesamtzeiten führt. Zudem liegt die Ablehnungsrate dieser Kombinationen mit rund 14% deutlich über den Werten der anderen Gruppen. Obwohl weniger Fahrgäste transportiert wurden, sind die zurückgelegten Distanzen aller Fahrzeuge verhältnismäßig hoch. Zu erklären ist dies mit dem größeren Zeitaufwand, um die Abholpositionen zu erreichen, der auf Grund einer längeren Wartezeit in Kauf genommen wurde. Allerdings führte der verhältnismäßig hohe Grad der Optimierung auch zu relativ geringen Fahrzeiten, wobei die langen Wartezeiten ausschlaggebend für die schlechten Gesamtzeiten sind. Bei der ausgeglichenen Reservierungskonfiguration war der Anteil der abgelehnten Fahrgäste mit unter 4% am geringsten und dennoch konnten mit rund 22 Minuten geringe Wartezeiten erreicht werden. Somit führt die zusätzliche Berücksichtigung der Fahrzeit zur Abholposition zu einer deutlichen Verringerung der Wartezeit im Vergleich zur vorigen Gruppe. Wird im Gegensatz dazu lediglich die Distanz bzw. Fahrzeit zur Abholposition berücksichtigt, führt dies zu den geringsten Wartezeiten, da genau die Position von einem Fahrzeug angesteuert wird, die am schnellsten zu erreichen ist. Allerdings ist, abgesehen von der Kombination mit $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$, in dieser Gruppe auch ein verhältnismäßig hoher Anteil an abgelehnten Fahrgästen zu verzeichnen, der aber mit unter 10% vertretbar ist. Im Hinblick auf die Fahrgastkonfiguration zeigt sich, dass die Berücksichtigung sowohl der aktuellen Fahrzeit als auch der Wartezeit eines Fahrgastes nicht wie erwartet zu einer Reduzierung der Gesamtzeit führt. Wird neben der Zeit bis zum Erreichen der Ablieferungsposition lediglich die aktuelle Fahrzeit bei der Gewichtung verwendet, konnten sowohl in dieser als auch in der vorigen Gruppe jeweils geringere Gesamtzeiten beobachtet werden. Im Gegensatz hierzu führt die ausschließliche Berücksichtigung der Fahrzeit zur Ablieferungsposition jeweils zu den schlechtesten Gesamtzeiten der letzten beiden Gruppen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass durch die Verwendung unterschiedlicher Gewichtungen ein entsprechender Einfluss auf die wesentlichen Kennwerte ausgeübt werden kann. Allerdings stellte sich eine ausschließliche Berücksichtigung der Wartezeit bei der Reservierungskonfiguration im Hinblick auf die resultierenden Wartezeiten als wenig sinnvoll heraus. Eine ausgeglichene Reservierungskonfiguration führt auf Kosten der Gesamtzeit insgesamt zu einer besseren Auslastung. Die kürzesten Gesamtzeiten wurden erzielt, wenn lediglich die Zeit zum Erreichen der Abholposition das ausschlaggebende Kriterium darstellt. Durch eine entsprechende Gewichtung bei der Fahrgastkonfiguration kann zudem die Fahrzeit verringert werden. Im folgenden Abschnitt wird das verteilte Verfahren für den bedarfsorientierten Transport einem bestehenden öffentlichen Verkehrsnetz gegenübergestellt und anhand unterschiedlicher Kennwerte verglichen.

5.3.3.5 DTN System im Vergleich zum öffentlichen Nahverkehr in London

Basierend auf den Ergebnissen des vorigen Abschnitts wird im Folgenden lediglich die Gewichtungskonfiguration für Reservierungen mit $\omega(R) = (1 \ 0)$ und für Fahrgäste mit $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ in Kombination mit dem verteilten Verfahren und dem periodischen Kooperationsmechanismus, der alle 10 Minuten ausgeführt wird, verwendet. Bei den folgenden Untersuchungen dient das Straßennetz Londons mit einer Gesamtfläche von rund 450 km² als Grundlage der Simulationsumgebung, wobei insgesamt 16 Depots, aus denen sowohl die

Busse als auch die Taxen starten oder zurückkehren, gleichmäßig über das Gebiet verteilt werden. Bezüglich der Fahrgastinstanzen wurden Listen mit 100, 200, 400, 600 und 800 Fahrgästen verwendet und wiederum eine Zeitspanne von 60 Minuten angesetzt, in der die einzelnen Fahrgäste der Simulationsumgebung hinzugefügt werden. Somit ergibt sich bei 800 Fahrgästen alle 4,5 Sekunden eine neue Anfrage. Der Schwellwert für die Ablehnung eines zu lange wartenden Fahrgast wurde im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen auf 33 Minuten reduziert. Dadurch ist zwar mit einer höheren Ablehnung zu rechnen, aber somit ist auch eine akzeptable Wartezeit zu erwarten. Im Zusammenhang mit der Bedingung bezüglich der maximalen Fahrzeit wurde die Abschwächung zurückgenommen, so dass auch diesbezüglich eine Verbesserung der größeren Fläche zu erwarten ist. Zu beachten ist dabei das wesentlich größere Gebiet der folgenden Simulationsläufe. Ansonsten wurde die Kooperationsreichweite der Fahrzeuge wieder auf 1.000 Meter festgelegt. Diese Distanz wurde auch als initialer Wert für Transportanfragen der Fahrgäste verwendet und alle 48 Sekunden um 500 Meter erhöht, sofern die Abholung des jeweiligen Fahrgastes nicht von einem Fahrzeug bestätigt wurde.

Im Rahmen dieser Analyse wird der beschriebene Ansatz unter Verwendung von DTNs mit dem existierenden öffentlichen Nahverkehrsnetz in London (englisch: Transport for London, TFL) verglichen. Der Vergleich basiert neben den Ergebnissen der Simulationsläufe auf der Verwendung der elektronischen Fahrplanauskunft [252]. In diesem Zusammenhang wurde eine Einschränkung auf das Busnetz vorgenommen, dessen Routen als rote Linien in Abbildung 5.44 dargestellt sind. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung wurden die erzeugten Fahrgastlisten für die Anfrage an die verfügbare API [217] genutzt. Unter Angabe eines Datums, der Uhrzeit, der Start- und Zielposition in Form von Koordinaten und den zu verwendenden Verkehrsmitteln wird eine Liste der möglichen Optionen zurückgegeben. Abhängig von der Startzeit, verbleibt in der Regel ein entsprechender Zeitraum bevor der Weg zur Haltestelle zu Fuß angetreten werden muss, um die vorgeschlagene Option zu nutzen. Diese Zeit wird als TFL Wartezeit bezeichnet. Anhand der erhaltenen Informationen können dabei auch die notwendigen Fahrzeugwechsel sowie deren Anzahl erfasst werden. Bei jeder vorgeschlagenen Option ist zusätzlich die Fahrzeit mit den öffentlichen Verkehrsmitteln, die auch die Wartezeiten bei Fahrzeugwechseln und den abschließenden Fußweg von der letzten Haltestelle bis zu den angegebenen Koordinaten beinhaltet, vermerkt. Dieser Zeitraum wird in Form der Fahrzeit dem bedarfsorientierten System gegenübergestellt. Als Startzeit wurde 9:00 Uhr an einem Mittwoch festgelegt, wobei die Verzögerung beim Erscheinen der Fahrgäste in der Simulationsumge-



Abbildung 5.44: Eigene Darstellung der Busrouten in London aus den OSM Daten

bung bei der Abfrage an die elektronische Fahrplanauskunft berücksichtigt wurde. Zur Automatisierung der notwendigen Anfragen wurde ein Werkzeug in Python entwickelt, mit dem die wesentlichen Werte für Wartezeit, Fahrzeit und die Anzahl der Fahrzeugwechsel für sämtliche Fahrgastlisten aller Instanzen abgefragt und gespeichert wurden und somit für einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen zur Verfügung standen. Abbildung 5.45 zeigt ein Bildschirmfoto eines Simulationslaufes bei dem 36 Depots verwendet wurden. Für die folgenden Untersuchungen ist deren Anzahl allerdings auf 16 Depots festgelegt.

Die anhand der elektronischen Fahrplanauskunft und die durch die Simulation erhaltenen Werte im Zusammenhang mit der Anzahl der notwendigen bzw. durchgeführten Fahrzeugwechsel sind in Abbildung 5.46a dargestellt. Dabei zeigen die grauen Balken die tatsächlich beobachteten Werte und die farbigen Balken den jeweiligen Unterschied. Die Ergebnisse für TFL befinden sich dabei in der oberen und die für das DTN System in der unteren Hälfte. Dabei ist zu erkennen, dass die Anzahl der direkten Transporte mit DTN bei kleinen Fahrgastinstanzen mit 96,9% sehr hoch ist und somit auch der Grad der Optimierung sehr gering ist. Allerdings steigt dieser, wie auch schon bei den vorangegangenen Untersuchungen, mit steigendem Fahrgastaufkommen an, so dass bei der Instanz von 800 Fahrgästen 77,9% Direkttransporte stattgefunden haben. 18,5% der Fahrgäste wechselten einmal das Fahrzeug und von 3,3% der Fahrgäste wurde das Fahrzeug zweimal gewechselt. Drei oder mehr Wechsel kamen in unter 0,4% der Fälle vor, wobei die maximale Anzahl von Fahrzeugwechseln über alle Instanzen 4 betrug. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei TFL über alle Instanzen eine relativ konstante Anzahl der jeweiligen Fahrzeugwechsel, so dass lediglich zwischen 13,5% und 15,2% das Ziel ohne Fahrzeugwechsel erreichten. Ein Fahrzeugwechsel musste von 29,0% bis 33,8% der Fahrgäste durchgeführt werden und zwei Fahrzeugwechsel lagen mit Werten zwischen 29,9% und 32,9% auf einem ähnlichen Niveau. Drei oder mehr Fahrzeugwechsel mussten im existierenden öffentlichen Nahverkehrsnetz von 18,5% bis 23,8% der Fahrgäste durchgeführt werden, wobei die höchste Anzahl der Fahrzeugwechsel über alle Instanzen bei 6 lag. Basierend auf der verhältnismäßig geringen Anzahl der notwendigen Fahrzeugwechsel steigt der Komfort der einzelnen Fahrgäste, da diese einerseits von der Abholposition zum entsprechenden Ziel befördert wird ohne einen Fußweg in Kauf nehmen zu müssen und andererseits reduziert sich neben der Anzahl von Fahrzeugwechseln auch die damit verbundene Wartezeit an den jeweiligen Haltestellen. Im Gegensatz zum simulierten System kam es bei den Anfragen an die Fahrplanauskunft auch zu Optionen, die ausschließlich zu Fuß zurückgelegt werden mussten, da entweder keine Abdeckung mit Bussen gewährleistet oder die Distanz verhältnismäßig gering war und diese Alternative die schnellste Option darstellte. Die Anzahl dieser Fälle lag dabei allerdings bei unter 1%, wobei die Wartezeit mit 0 und die

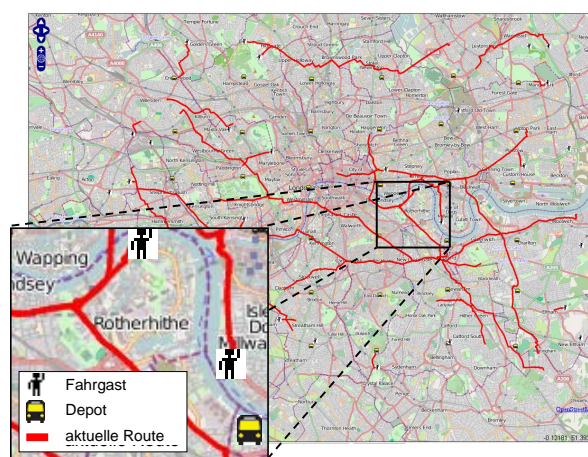
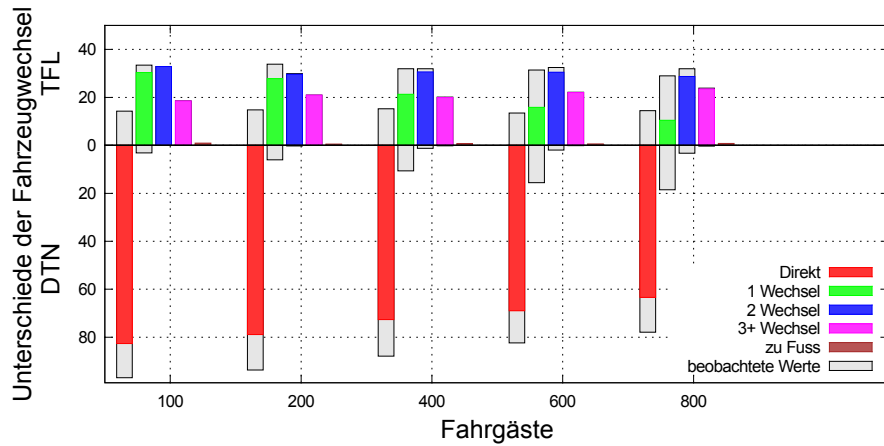
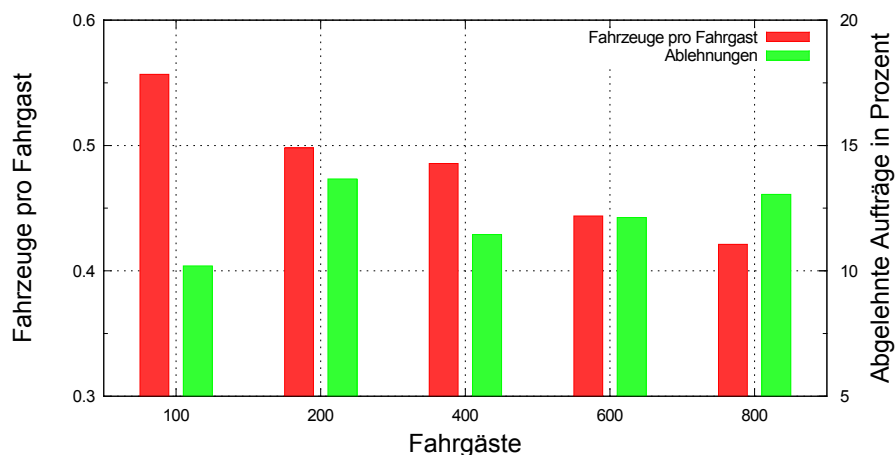


Abbildung 5.45: Bildschirmfoto einer Simulation



(a) Fahrzeugwechsel



(b) Fahrzeugnutzung und Ablehnungen

Abbildung 5.46: Verhältnis der Fahrzeugwechsel und eingesetzte Fahrzeuge pro Fahrgast sowie Anteil der abgelehnten Transportaufträge

Fahrzeit mit der von der Fahrplanauskunft geschätzten Gehzeit zum Ziel veranschlagt wurde und zwischen 2 und 60 Minuten betrug. Im Zusammenhang mit dem Verhältnis von Fahrzeugen pro Fahrgast, das für das DTN System in Abbildung 5.46b dargestellt ist, sinkt die Anzahl der benötigten Busse im Vergleich zum Fahrgastaufkommen und belegt damit die Skalierbarkeit des Ansatzes. Allerdings ist der Anteil der abgelehnten Transportaufträge auf Grund der verringerten maximalen Wartezeit mit bis zu 13% bei 800 Fahrgästen vergleichsweise hoch.

Als weitere Kennwerte sind die absoluten beobachteten Zeiten beider Systeme sowie deren relatives Verhältnis zueinander in den Abbildungen 5.47a und 5.47b dargestellt. Insgesamt betrachtet weisen die relativen Werte über alle Instanzen einen ähnlichen Verlauf auf. Bei der genaueren Analyse zeigt sich, dass bei sämtlichen Fahrgastinstanzen die durchschnittlichen Wartezeiten des DTN Systems mit maximal rund 14 Minuten deutlich über denen von TFL mit ca. 6 Minuten liegen. Allerdings kann mit dem DTN System eine Verringerung der Fahrzeit um etwa 15% oder fast 17 Minuten bei der Instanz von 800 Fahrgästen erreicht werden. Wie aus den Ergebnissen ersichtlich, führt die wieder eingeführte Restriktion der maximalen Fahrzeit zu verhältnismäßig konstanten Werten, so dass die Gesamtzeit mit 10,1% oder fast 12 Minuten

unter der des öffentlichen Verkehrsnetzes liegt. Bezogen auf die Untersuchungen des vorigen

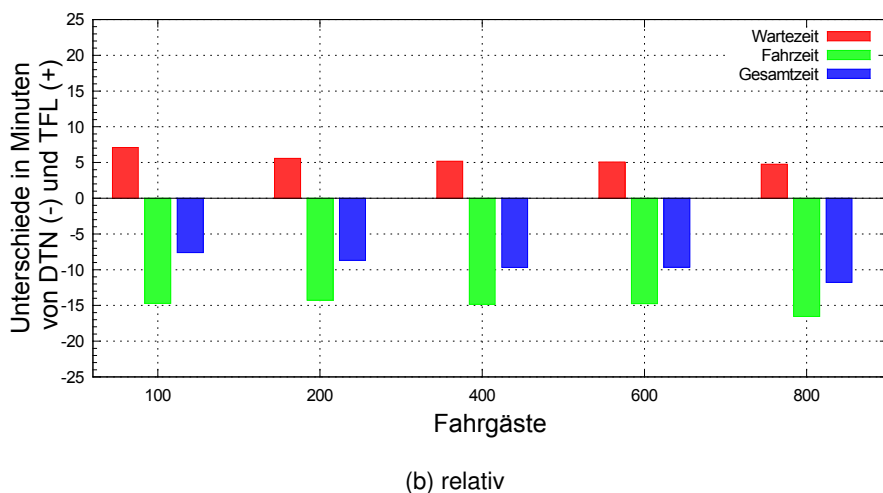
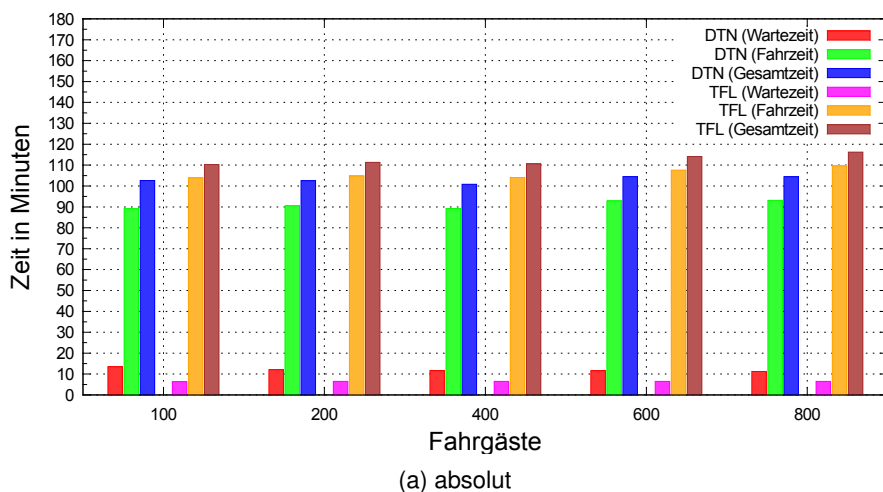


Abbildung 5.47: Warte-, Fahr- und Gesamtzeit von DTN und TFL

Abschnitts wurden diese Simulationen mit der Kombination aus $\omega(R) = (1 \ 0)$ und $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ durchgeführt. Daher sind weitere Verbesserungen durch eine entsprechende Anpassung der Gewichtungen möglich. Allerdings ist davon auszugehen, dass eine Optimierung der Zeiten auch zu einem höheren Anteil an abgelehnten Transportaufträgen oder zu einem verstärkten Fahrzeugeinsatz führt. Insgesamt kann basierend auf den Ergebnissen des Vergleichs mit dem existierenden öffentlichen Nahverkehr in London, der allerdings auf das

Gewichtungskonfiguration	Gesamtzeit [Minuten]	Wartezeit [Minuten]	Fahrzeit [Minuten]	Distanz aller Fahrzeuge [km]	Abgelehnte Fahrgäste [%]	1 Wechsel [%]
$\omega(R) = (1 \ 0)$, $\omega(F) = (1 \ 0 \ 0)$ (DTN)	104,4	11,3	93,1	14.647	13,0	18,5
Transport for London (TFL)	116,2	6,5	109,7	-	0,7	28,9

Tabelle 5.6: Vergleich der wesentlichen Kannwerte für DTN und TFL

Busnetz beschränkt wurde, festgehalten werden, dass sich das untersuchte DTN System für

den existierenden bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Personentransport eignet. Dabei wird der Komfort potenzieller Fahrgäste einerseits durch eine deutlich geringere Anzahl der notwendigen Fahrzeugwechsel im Vergleich zum öffentlichen Verkehrsnetz gewährleistet und andererseits werden die Fahrgäste von einer beliebigen Position zum gewünschten Ziel befördert. Damit entfällt der notwendige Weg zur Haltestelle, der in der Regel zu Fuß zurückgelegt werden muss. Der Grad der Optimierung im Sinne der durchgeführten Fahrzeugwechsel ist trotz des großen Gebiets von rund 450 km² im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.3.4 und unter Berücksichtigung der Gewichtungskonfiguration bei einer Instanz von 600 Fahrgästen leicht angestiegen. Dies ist auf den vermehrten Fahrzeugeinsatz durch das größere Gebiet zurückzuführen, der auch für eine schlechtere Fahrzeugauslastung verantwortlich ist. Allerdings sinkt im Hinblick auf die Fahrzeugnutzung auch hier die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge im Verhältnis zum Fahrgastaufkommen und demonstriert damit die Skalierbarkeit des Systems. Mit der abnehmenden Anzahl von Fahrzeugen pro Fahrgast steigt gleichzeitig auch die Auslastung und ermöglicht einen effizienteren Einsatz der Fahrzeuge insbesondere bei höherem Fahrgastaufkommen. Hinzu kommt, dass im Rahmen der Simulationen und im Vergleich zum bestehenden Nahverkehr in London die wesentlich geringeren Fahrzeiten trotz der längeren Wartezeiten zu rund 10% kürzeren Gesamtzeiten führen.

In den letzten Abschnitten wurden zahlreiche Aspekte des Prinzips der dynamischen Transferknoten und deren Verwendung in unterschiedlichen Bereichen sowohl in Verbindung mit dem Waren- als auch mit dem hier im Vordergrund stehenden Personentransport untersucht. Im nächsten Abschnitt werden diese nochmals kurz zusammengefasst und bewertet.

5.3.3.6 Zusammenfassung der quantitativen Untersuchungen

Basierend auf der Simulationsumgebung wurden in den letzten Abschnitten unterschiedliche Einsatzgebiete im Zusammenhang mit dem Prinzip der dynamischen Transferknoten zur Kooperation untersucht und quantitative Analysen durchgeführt. Zunächst lag der Fokus hierbei auf dem Nutzen der Optimierungsphase, die in Abschnitt 4.3.3.2 beschrieben wurde. Im Anschluss an die initialen Experimente, bei denen eine einfache Gitterstruktur als Straßennetz diente, wurde unter Verwendung des zentralen Verfahrens zunächst der Effekt des Prinzips der dynamischen Transferknoten auf unterschiedliche Kennwerte im Bereich Logistik untersucht. Bei der Verwendung realistischer Straßennetze, ergab sich bei den Simulationen und dem Vergleich mit dem direkten Transport ein erhebliches Einsparungspotenzial bezüglich der von den verwendeten Fahrzeugen zurückgelegten Distanzen. Zusätzlich standen die Fahrzeuge mit Hilfe des DTN Ansatzes einerseits früher wieder für den Transport zur Verfügung, und andererseits konnte die Auslastung der Fahrzeuge im Vergleich zum direkten Transport gesteigert werden. Allerdings sorgten unter anderem die Umladezeiten der Waren und der zusätzliche Weg zu einem möglichen Umschlagplatz für eine deutliche Verzögerung der Lieferzeit. Somit muss in diesem Zusammenhang eine Abwägung bezüglich Einsparungspotenzial und Lieferzeit getroffen werden. In Verbindung mit dem Personentransport kann allerdings die Transferzeit im Vergleich zur Umladezeit erheblich reduziert werden, wodurch sich dieses Verfahren beispielsweise für den Überlandtransport unter Verwendung von Reisebussen eignet.

Mit Hilfe des unterstützenden Verfahrens wurden im Anschluss die Auswirkungen bezüglich unterschiedlicher Straßennetzmorphologien in Verbindung mit dem Personentransport in städtischen Gebieten untersucht. Hierbei ist zu bemerken, dass im Rahmen der Simulationen ausschließlich dynamische Anfragen betrachtet wurden, so dass eine Tourenplanung im Vorfeld nicht möglich ist. Bei dieser Analyse wurden die Straßennetze von Barcelona und München verwendet, wobei die Minimierung der von den Fahrzeugen zurückzulegenden Distanzen sowie deren Anzahl im Vordergrund standen, weshalb sich die Warte-, Fahr- und Gesamtzeiten als nicht praktikabel für den Einsatz in der Realität herausgestellt haben. Dennoch wurden unter Verwendung des kooperativen Verfahrens erhebliche Einsparungen der Wartezeit von bis zu 12% in Barcelona und bis zu 17% in München erreicht. Da sich bei diesen Simulationsläufen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Fahrzeiten ergeben haben, führte dies zu deutlich kürzeren Gesamtzeiten. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von DTNs zur Optimierung und trotz des minimalen Fahrzeugeinsatzes eine Distanzeinsparung von fast 4% pro Fahrzeug erreicht wurde. Zusätzlich konnte auch die Auslastung der Fahrzeuge verbessert werden, wobei tendenziell weniger Fahrzeuge bei größeren Fahrgastzahlen im gleichen Zeitraum benötigt wurden, was die Skalierbarkeit des kooperativen Verfahrens belegt.

Anschließend wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Einstellungen der Gewichtungskonfigurationen betrachtet, wobei zwei unterschiedliche Fahrzeugtypen zum Einsatz kamen. Prinzipiell ist dabei eine Kooperation zwischen unterschiedlichen Fahrzeugtypen vorstellbar, die aber nicht berücksichtigt wurde, so dass der Transport mit einem Taxi als abgelehnter Transportauftrag gewertet wurde. Die einzelnen Gewichte (vgl. Abschnitt 4.3.3.2) bezogen sich bei wartenden Fahrgästen auf die Fahrzeit zwischen Fahrzeug und Fahrgast sowie die Wartezeit. Bei den aktiven Fahrgästen wurden die Fahrzeit zur entsprechenden Zielposition, die bis zur Abholung verstrichenen Wartezeit sowie die aktuelle Fahrzeit unterschiedlich stark berücksichtigt. Abhängig von der jeweiligen Gewichtungskonfigurationen ergaben sich bei den akzeptablen Kombinationen Unterschiede bei der Gesamtzeit von fast 15% und bei den zurückgelegten Distanzen lagen diese bei rund 5%. Je nach Gewichtungskonfiguration lagen die Unterschiede bei der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge bei über 8%. Insgesamt erlauben die vorgestellten Ansätze damit eine Optimierung bezüglich unterschiedlicher Kriterien durch eine entsprechende Gewichtung der verwendeten Parameter. Somit können die vorgestellten Verfahren an die Bedürfnisse oder den Einsatzzweck individuell und flexibel angepasst werden.

Im Hinblick auf die Ergebnisse dieser Analyse wurde eine Konfiguration aus der oberen Hälfte bezogen auf die Gesamtzeit ausgewählt und für den im Anschluss vorgestellten Vergleich zwischen dem verteilten Verfahren des DTN Systems und dem bestehenden Busnetz in London auf einer Fläche von ca. 450 km² herangezogen. Die beobachteten Ergebnisse verdeutlichen dabei das Potenzial des entwickelten Kooperationsverfahrens, mit dem einerseits Verbesserungen der Gesamtzeit und andererseits eine deutliche Verbesserung des Fahrgastkomforts, durch eine erhebliche Reduzierung der notwendigen Fahrzeugwechsel, erreicht werden konnte. Zudem werden die Fahrgäste an beliebigen Position abgeholt bzw. abgeliefert und müssen daher keinen Fußweg zu bzw. von den jeweiligen Haltestellen zurücklegen. Dabei steigt die Anzahl der benötigten Fahrzeuge unterproportional zum

Fahrgastaufkommen und belegt damit die Skalierbarkeit, so dass entsprechende Systeme auch in Megastädten, zu denen auch London zählt, umgesetzt werden könnten.

Zusätzlich kann beispielsweise auch die Anwendung aus Abschnitt 5.1.2 zur weiteren Optimierung verwendet werden. In Verbindung mit dem bedarfsorientierten Personentransport können Fahrgäste, deren Abholpositionen sich ohnehin in unmittelbarer Nähe befindet, eine Position vereinbaren, an der beide Fahrgäste abgeholt werden. Somit muss das entsprechende Fahrzeug lediglich einmal zum Aufnehmen beider Fahrgäste anhalten, wodurch zusätzliche Zeit eingespart wird. Allerdings müsste hierbei auf den zusätzlichen Komfort der Abholung an einer beliebigen Position verzichtet und die Distanz zur vereinbarten Position zu Fuß zurückgelegt werden. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen, bei denen auch Taxen zum Einsatz gekommen sind, wurde bisher keine Kooperation zwischen Fahrzeugen unterschiedlichen Typs berücksichtigt, die allerdings im Rahmen der Simulationsumgebung möglich ist. Dabei können Taxen die Fahrgäste an Busse übergeben, deren aktuelle Fahrgäste zu in der Nähe befindlichen Zielen befördert werden. Dadurch kann auch dieser Fahrzeugtyp durch die Kooperation effizienter genutzt werden und bietet dadurch weitere Optimierungsmöglichkeiten für die praktische Umsetzung eines kooperativen Transportsystems. Insbesondere bei der Kooperation von Fahrzeugen unterschiedlicher Mobilitätsanbieter müssen geeignete Maßnahmen und Systeme eingesetzt werden, die eine Abrechnung der Einnahmen unter Berücksichtigung der jeweiligen Kosten gewährleisten. In diesem Zusammenhang bieten sich mobile Bezahlungssysteme an, mit denen beispielsweise durch die verfügbare Sensorik unter anderem eine strecken- oder zeitgenaue Fahrpreiskalkulation ermöglicht werden kann. Durch entsprechende Anpassungen, können die vorgestellten Verfahren auch als Ergänzung zu bestehenden öffentlichen Verkehrsnetzen verwendet werden, so dass die Fahrzeuge basierend auf den Zielpositionen der Fahrgäste geeignete Haltestellen unter Berücksichtigung der Abfahrtszeiten des schienengebundenen Verkehrs bedienen.

5.4 Ein System zur Umweltüberwachung und die weitergehende Nutzung von Umweltinformationen

In den letzten Jahren sind, insbesondere in städtischen Regionen, die Probleme im Zusammenhang mit der steigenden Schadstoffbelastung immer mehr in den Vordergrund gerückt. Ein wesentlicher Faktor für die Zunahme der Belastung durch Schadstoffe ist die steigende Motorisierung der Bevölkerung und das damit verbundene Verkehrsaufkommen. Nach Informationen des World Business Council for Sustainable Development ist bis zum Jahr 2050 mit einer Verdreifachung der globalen PKW-Motorisierung zu rechnen. Während sich der Anstieg in den Industrieländern tendenziell abschwächt, wird die Motorisierung mit dem steigenden Wohlstand in den Schwellenländern weiterhin stark ansteigen und damit auch die dadurch verursachte Schadstoffbelastung [259]. In diesem Abschnitt wird ein kollaboratives System zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen vorgestellt. Durch die Integration von geeigneten Sensoren in mobilen Endgeräten [119, 166] wird in Zukunft eine breitere Erfassung von Umweltinformationen ermöglicht.

5.4.1 System zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen

Zur Reduzierung der durch den Verkehr verursachten Belastung wurden in zahlreichen Ballungszentren in Deutschland so genannte Umweltzonen eingeführt. In diese Zonen dürfen nur Fahrzeuge hineinfahren, die entsprechende Mindeststandards beim Schadstoffausstoß erfüllen. Trotzdem haben nach einer vorläufigen Studie des deutschen Bundesumweltamtes [31] die Werte für Feinstaub den Durchschnittswert der letzten 4 Jahre überstiegen. Die Überwachung der Schadstoffkonzentration erfolgt bisher mit Hilfe fest installierter Messstationen, die in der Regel mit unterschiedlichen Sensoren zur Schadstoffmessung ausgestattet sind. Zwar handelt es sich dabei um präzise Sensoren, aber die Messungen erfolgen nur punktuell und erlauben daher lediglich die Überwachung kleinerer Gebiete.

In Zukunft werden genauere und flächendeckende Informationen über die aktuelle Luftverschmutzung notwendig sein, die eine präzise Überwachung und Überprüfung der Zielwerte für den Ausstoß von Treibhausgasen und Schadstoffen ermöglichen, welche im Kyoto-Protokoll verbindlich festgehalten wurden. Um dies zu erreichen ist ein kollaborativer Ansatz zur Erfassung entsprechender Daten sinnvoll. Die Messungen werden dabei von zahlreichen Sensoren, die teilweise in mobilen Endgeräten, Fahrzeugen oder der Verkehrsinfrastruktur integriert sein werden, vorgenommen, wie in Abbildung 5.48 veranschaulicht.

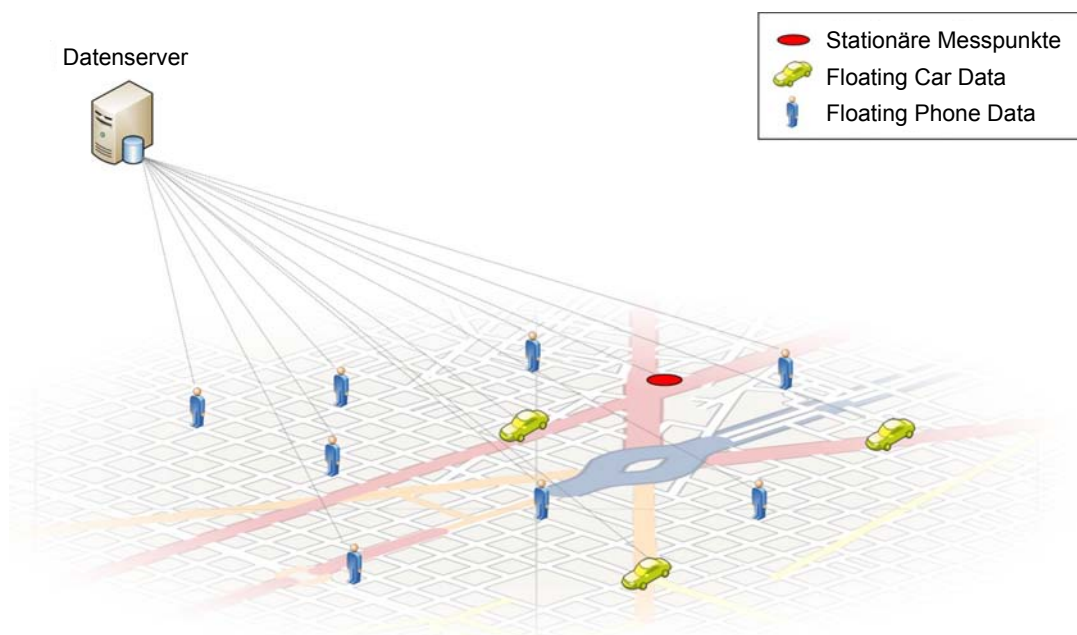


Abbildung 5.48: Systemüberblick der kollaborativen Schadstoffüberwachung

Das im Folgenden vorgestellte System [67] dient zur Auswertung der erhaltenen Messwerte und zur Kombination mit Umweltdaten von bereits vorhandenen, statischen Messstationen. Dadurch wird zum einen eine höhere Abdeckung des Messgebietes erzielt und zum anderen können durch eine Integration geeigneter Sensoren die Kosten für deren Ausbringung und Wartung minimiert werden.

5.4.1.1 Systemüberblick

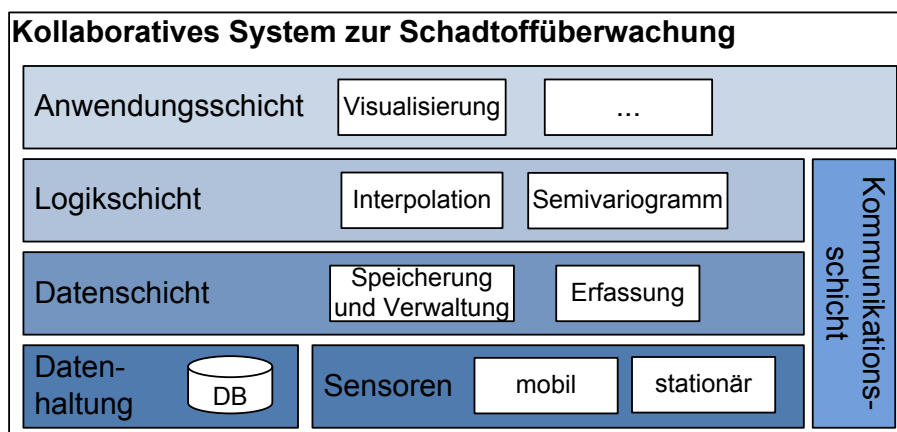


Abbildung 5.49: Grundlegende Architektur zur kollaborativen Schadstoffüberwachung

Zunächst wird ein Überblick des Systems zur kollaborativen Überwachung von Umweltinformationen anhand der in Abbildung 5.49 dargestellten Architektur gegeben, bevor im weiteren Verlauf die notwendigen Komponenten sowie deren Funktionsweise und Umsetzung erläutert werden. Die vorgeschlagene Architektur basiert auf unterschiedlichen Schichten, wobei die unterste Schicht zum einen aus mobilen und stationären Sensoren besteht, die Messungen im Zusammenhang mit der Luftqualität bzw. deren Verschmutzung vornehmen und dem System zur Verfügung stellen. Zum anderen erfolgt in dieser Schicht serverseitig die permanente Speicherung der georeferenzierten Messwerte mit Hilfe einer Datenbank, die auch das Straßennetz der jeweiligen Region enthält. Die Datenschicht ist im Wesentlichen für die Vorverarbeitung der übermittelten Messwerte zuständig, die unter anderem Angaben über die Position der Messung enthalten. Anhand zusätzlicher Informationen, wie beispielsweise über den Sensortyp oder die jeweilige Einheit der Messung, kann eine qualitätsbasierte Klassifizierung oder die Umrechnung in einheitliche Basisdaten erfolgen. Eine entsprechende Klassifikation der Messwerte erscheint sinnvoll, da insbesondere bei Sensoren in mobilen Endgeräten von einer wesentlich schlechteren Qualität ausgegangen werden kann, als bei fest installierten Messstationen und somit entsprechende Gewichtungen bezüglich des Einflusses vorgenommen werden können. Neben dem Empfang und gegebenenfalls der notwendigen Vorverarbeitung müssen die Daten organisiert und verwaltet sowie den oberen Schichten zur Verfügung gestellt werden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Messungen sowohl in der Genauigkeit als auch in ihrer Dichte schwanken und zudem in den Dimensionen Ort und Zeit variieren, wird hierfür eine effiziente Verwaltung benötigt. Innerhalb der Logikschicht werden die punktuell erfassten Messwerte genutzt, um unter Verwendung eines geeigneten Verfahrens flächendeckende Schadstoffwerte für das vorgesehene Gebiet zu berechnen. Die Anwendungsschicht stellt die berechneten Daten der Logikschicht zur Verfügung, die von entsprechenden Diensten genutzt werden können. Die Dienste oder Anwendungen sind hierbei für eine geeignete Aufbereitung der Daten zuständig. Bevor die Umsetzung der einzelnen Schichten erläutert wird, werden zunächst die grundlegenden Anforderungen an das System zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen vorgestellt. Die Kommunikationsschicht erlaubt eine verteilte Umsetzung des Systems,

bei der beispielsweise die Datenhaltungsschicht in einem unabhängigen Backend System implementiert werden kann. Zusätzlich werden unterschiedliche Schnittstellen für den Empfang von Messwerten angeboten.

Anforderungen für kollaboratives Umweltmonitoring

Damit eine hohe Auflösung durch eine Vielzahl von Messungen erzielt werden kann, die hauptsächlich von mobilen Sensoren erfasst werden, müssen die Geräte mit entsprechender Hardware ausgestattet werden. Diese muss dabei sehr kompakt sein und sollte idealerweise eine hohe Messgenauigkeit gewährleisten. Im Zusammenhang mit Umweltinformationen bieten sich Sensoren für NO_2 , CO_2 und CO an, die mittlerweile kostengünstig und in geeigneter Größe zur Verfügung stehen. Insbesondere bei mobilen Endgeräten spielt der Stromverbrauch eine wesentliche Rolle und sollte daher möglichst gering sein. Alternativ können Sensoren, die über eine eigene Energiequelle verfügen, beispielsweise mit Smartphones verbunden werden.

Die gemeinschaftlich erfassten Messungen, die dem System zur Überwachung von Umweltdaten zur Verfügung gestellt werden, müssen zur weiteren Auswertung zusätzlich mit Positionsangaben über den Ort der Messung verknüpft werden. Bei fest installierten Messstationen stellt dies kein Problem dar, wohingegen sich die Position von mobilen Sensoren permanent verändert. Bei modernen Smartphones kann die Position entweder mit Hilfe eines GPS-Empfängers oder basierend auf den Mobilfunksendemasten, die sich in der Nähe des entsprechenden Gerätes befinden, bestimmt werden und ermöglicht entsprechende Positionsangaben.

Auf Grund der zahlreichen und teilweise auch ungenauen Messungen muss das Verfahren zur weiteren Auswertung einerseits skalierbar sein und andererseits robust gegenüber Störeinflüssen oder Messfehlern arbeiten. Mit Bezug auf die Skalierbarkeit ist eine geeignete Speicherstruktur notwendig, um eine entsprechende Anzahl von Messwerten effizient zu verwalten. Neben der effizienten Verwaltung der Messwerte muss ein geeignetes Verfahren verwendet werden, um anhand der verfügbaren Stichproben Rückschlüsse auf die gesamte Region zu ziehen. Die Störeinflüsse beziehen sich einerseits auf den Grad der Abdeckung, da die Anzahl an Messungen im Laufe eines Tages - vergleichbar mit der Aktivität der Personen - entsprechenden Schwankungen unterliegen und andererseits auf die Genauigkeit der Messungen selbst, die abhängig von der eingesetzten Hardware und dem Ort der Messung teilweise starken Schwankungen unterliegen. Das Verfahren sollte dabei möglichst in Echtzeit arbeiten, wobei in diesem Zusammenhang ein Kompromiss zwischen der Geschwindigkeit und der Genauigkeit bzw. Robustheit eingegangen werden muss. Damit sich die gewonnenen oder vom System berechneten Daten für unterschiedliche Zwecke verwenden lassen, müssen diese flexibel für den entsprechenden Anwendungszweck abgebildet werden können.

In den folgenden Abschnitten werden die entwickelten Komponenten der jeweiligen Schichten vorgestellt und deren Umsetzung in Form von entsprechenden Komponenten erläutert.

Komponenten der Datenschicht

Die beiden Hauptaufgaben dieser Schicht sind die Erfassung bzw. der Empfang von Messwerten und die Verwaltung der übermittelten Daten. Zur persistenten Speicherung der

Daten kommt, wie auch schon bei der Simulationsumgebung aus Abschnitt 5.3.2, eine PostgreSQL/PostGIS Datenbank zum Einsatz, in der neben dem Straßennetz auch die Messdaten abgelegt werden. Für die Messwerte wurden zwei zusätzliche Tabellen, eine für den eigentlichen Messwert und eine für die Quadtree Datenstruktur, hinzugefügt.

Erfassung: Zu den erfassten Daten, die von den mobilen oder stationären Sensoren bereitgestellt werden, gehören neben den GPS Koordinaten des Messpunktes und den eigentlichen Messwerten auch der jeweilige Sensortyp. Die Angabe des Sensortyps ermöglicht eine einfache Klassifizierung der Messwerte und erlaubt beispielsweise Aussagen über die Qualität der Messung, die im weiteren Verlauf entsprechend berücksichtigt werden kann. Dabei sollten Messwerte mit hoher Qualität stärker gewichtet werden als Messungen, die eine niedrige Qualität aufweisen. Mögliche Klassen sind beispielsweise stationäre Messstationen, in Fahrzeugen fest installierte Sensoren, die entsprechende Daten als Floating Car Data zur Verfügung stellen und mobile oder tragbare Sensoren, die entweder über die Luftschnittstelle mit Smartphones verbunden werden können oder in entsprechende Geräte integriert wurden und als Floating Phone Data bezeichnet werden.

Speicherung und Verwaltung: Nachdem die Daten von den entsprechenden Sensoren zusammen mit den notwendigen Informationen an den Server übermittelt wurden, wird unter Berücksichtigung der Echtzeitfunktionalität vom Server zusätzlich ein Zeitstempel gesetzt. Da bei Daten, die von den heterogenen Sensoren übermittelt werden, nicht von einer synchronen Uhr auszugehen ist, wird angenommen, dass die Messwerte unverzüglich nach der Erfassung an den Server übermittelt werden. Anhand des zusätzlichen Zeitstempels wird dieser mit den Angaben zum Messzeitpunkt verglichen. Liegt der Messzeitpunkt dennoch zu weit in der Vergangenheit, so wird der erhaltene Datensatz verworfen, um eine Verfälschung zu vermeiden. Zusätzlich kann von einer ungleichmäßigen räumlichen Verteilung und einer hohen Varianz bezüglich der Messdichte abhängig von der jeweiligen Tageszeit ausgegangen werden. Dies führt dazu, dass zu bestimmten Zeiten in einigen Bereichen des Gebiets wenige bis gar keine Messwerte vorliegen, wohingegen andere Regionen eine sehr hohe Messdichte aufweisen. Die, auf Grund der Parallelisierbarkeit verwendeten, lokalen Interpolationsverfahren basieren allerdings auf benachbarten Messwerten. Im Gegensatz zur verhältnismäßig inperformanten Suche der k nächsten Nachbarn, werden die Messwerte in einer adaptiven Datenstruktur verwaltet. Das hierfür verwendete Quadtree Verfahren aus Abschnitt 4.2.2 erlaubt dabei eine hierarchische Unterteilung des Gebietes anhand der Gridzellen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Vorgehensweise zur Erstellung der entsprechenden Struktur werden hierbei keine gleichmäßigen Quadrate erzeugt, sondern mit Hilfe eines Quantilverfahrens Zellen erzeugt, die eine möglichst gleiche Anzahl von Messwerten enthalten. Basierend auf dem 0,5 Quantil wird in jeder Dimension der Median bestimmt und der Raum entlang der entsprechenden Splitachsen unterteilt. Der Raum wird ebenfalls in vier kleinere Teilräume zerlegt, wobei sich deren Seitenlängen in der Regel unterscheiden. Dennoch kann eine Verwaltung auf Basis des Quadtree Verfahrens beibehalten werden. Dabei passt sich die entstehende Struktur dynamisch an die Anzahl und die Positionen der Messwerte an. Mit Hilfe des Quantilverfahrens können somit auch

räumlich stark ungleich verteilte Daten effizient verwaltet werden. Im Zusammenhang mit den Interpolationsverfahren ist das erläuterte Quadtree Verfahren besonders geeignet, da für eine Suchanfrage nach ausreichend vielen nächsten Nachbarn lediglich die vorliegenden Daten der entsprechenden Zelle abgefragt werden müssen, die unabhängig voneinander etwa gleich viele Datensätze aufweisen. Abbildung 5.50 zeigt das Ergebnis des erläuterten Verfahrens für den Freistaat Bayern auf Basis generierter Messwerte. Für nähere Erläuterungen zur Erzeugung der synthetischen Messwerte wird auf Abschnitt 5.4.1.2 verwiesen. Die hierfür erzeugten Messwerte unterliegen einer stark ungleichmäßigen räumlichen Verteilung, weshalb sich die Gridzellen stark in ihrer Größe unterschieden und bei den Ballungszentren Nürnberg, Regensburg und München deutlich kleiner sind als in ländlichen Regionen.

Eine weitere Aufgabe dieser Komponente ist das Entfernen veralteter Messwerte, die nicht mehr in der Berechnung des Interpolationsverfahrens berücksichtigt werden sollen. Die in der Datenbank vorliegenden Messwerte werden statisch nach einer vom jeweiligen Schadstoff und dessen Verhalten abhängigen Zeitspanne entfernt und können dabei als Historie in einer separaten Tabelle gespeichert werden. Unter Berücksichtigung der Echtzeitfunktionalität ist die Zeitspanne möglichst kurz, aber so zu wählen, dass eine ausreichende Anzahl an Messwerten zur Interpolation genutzt werden kann. Bei diesem Prozess wird vergleichbar mit dem Eingehen neuer Messwerte gleichzeitig die zuvor erläuterte Datenstruktur aktualisiert und passt sich daher der aktuellen Messdichte an. Hierbei wird versucht, Zellen, deren minimale Anzahl an Messwerten unterschritten ist, mit den benachbarten Zellen zu vereinen, unter der Voraussetzung, dass die maximale Anzahl an Messwerten pro Zelle nicht überschritten wird. Da dies allerdings zu ungleichmäßig verteilten Messwerten innerhalb einer Zelle führen kann, die ursprünglich mit Hilfe des Quantilverfahrens erzeugt wurde, besteht auch die Möglichkeit einer partiellen Reorganisation der betroffenen Teiläste des Quadrees. Dadurch ist gewährleistet, dass nach jedem statischen Aufruf zum Entfernen veralteter Daten im Anschluss die bestmögliche räumliche Unterteilung der aktuellen Messwerte erreicht wird.

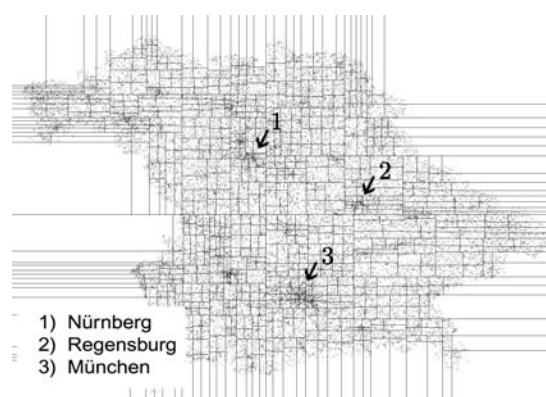


Abbildung 5.50: Abbildung eines Quadrees mit Quantilverfahren

Komponenten der Logikschicht zur Interpolation der Messwerte

In der Logikschicht befinden sich die Komponenten zur Interpolation der Messwerte. Durch die Verwendung der in Abschnitt 4.4.3 erläuterten Kriging Verfahren zur Interpolation wird dabei zum einen die Punktipinterpolation zur Berechnung der Schadstoffkonzentration auf dem Straßennetz und zum anderen die Rasterinterpolation zur Berechnung der Schadstoffkonzentration einer Fläche umgesetzt. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, die in der Regel auf zahlreichen Informationen beispielsweise über die Bebauung, die Verkehrsdichte oder den prozentualen Anteil von bestimmten Fahrzeugtypen basieren, werden hierbei lediglich die Messwerte benötigt. Die Kriging Verfahren setzen dafür sowohl normalverteilte Messwerte als auch die intrinsische Stationarität voraus, weshalb entsprechende Maßnahmen

zur Kompensation verwendet werden. Dennoch erlauben diese Verfahren sowohl Aussagen über die Genauigkeit der Schätzung als auch die Berücksichtigung von Messfehlern bzw. entsprechenden Abweichungen. Im Allgemeinen wird bei Luftverschmutzungsdaten eine Lognormalverteilung angenommen [112, 123, 168]. Zur Erstellung der Semivariogramme und zur anschließenden Interpolation werden daher die Messwerte mit Hilfe des natürlichen Logarithmus entsprechend transformiert und können dadurch als Eingangsdaten verwendet werden. Da sich der Erwartungswert der Messwerte an einer vielbefahrenen Hauptstraße in der Innenstadt vermutlich deutlich von dem eines Wohngebietes am Stadtrand unterscheidet, kann kein globaler Erwartungswert für das gesamte Gebiet einer Stadt angenommen werden. Die intrinsische Stationarität kann allerdings gewährleistet werden, wenn das jeweilige Untersuchungsgebiet räumlich begrenzt wird und ein lokaler Interpolationsprozess lediglich mit den darin enthaltenen Daten arbeitet. In diesem Fall entspricht das jeweilige Untersuchungsgebiet einer Zelle des Quadtree, wobei davon auszugehen ist, dass durch diese Einschränkung eine annähernde intrinsische Stationarität bzw. Quasistationarität vorliegt.

Eine grundsätzliche Voraussetzung bei der Anwendung der Kriging Verfahren ist die Erstellung gültiger theoretischer Semivariogramme, die in drei Schritten erfolgt. Zunächst werden die relevanten Messwerte des jeweiligen Untersuchungsgebietes extrahiert und auf deren Basis im zweiten Schritt experimentelle Semivariogramme erstellt. Diese werden abschließend mit Hilfe einer automatischen Semivariogrammanpassung in theoretische Semivariogramme überführt.

Um einer zu geringen Datendichte bzw. Anzahl an Messwerten innerhalb einer Quadtreezelle vorzubeugen und um mehrere Anfragen aus Gründen der Performanz zu vermeiden, werden bei der Extraktion zunächst alle Messwerte der Zelle unabhängig von deren Messzeitpunkt, aber nach dem Alter sortiert, von der Datenschicht angefordert. Anschließend wird überprüft, ob eine ausreichende Anzahl an Messwerten in einem festgelegten Zeitintervall vorliegt. Ist dies nicht der Fall, erfolgt eine statistische Auswertung der Daten, bei der für jeden diskreten Zeitpunkt die Anzahl der vorliegenden Messpunkte ermittelt wird. Anschließend wird nach dem kleinsten Intervall gesucht, in dem maximal viele Messwerte vorliegen. Im Fall einer zu geringen Messdichte muss daher ein gewisser Grad an Ungenauigkeit toleriert werden, wobei angenommen werden kann, dass das grundlegende räumliche Verhalten der Messwerte unabhängig von der Zeit vergleichbar ist.

Semivariogramm: Für die Erstellung des experimentellen Semivariogramms werden die tatsächlichen Messwerte innerhalb der Zelle und dem festgelegten Zeitintervall verwendet. Ist die räumliche Ausdehnung einer Zelle zu groß, um eine Quasistationarität anzunehmen, wird diese sukzessive in kleinere Teilzellen zerlegt, die wiederum wie eine Zelle des Quadtree behandelt werden. Sofern keine Unterteilung wegen einer zu geringen Messdichte vorgenommen werden kann, muss im entsprechenden Fall die Nichtstationarität hingenommen werden. Dadurch wird aus jeder Zelle nach dem in Abschnitt 4.4.3.1 beschriebenen Verfahren ein experimentelles Semivariogramm erstellt.

In einem letzten Schritt wird jedes der erstellten experimentellen Semivariogramme automatisch an ein theoretisches Semivariogrammmodell (vgl. Tabelle 4.4) angepasst. Hierfür wird

ein geeignetes Verfahren benötigt, welches ausschließlich anhand der Messwerte die automatische Anpassung vornimmt. Ein solches Verfahren wird bei dem Echtzeitinterpolationsdienst Automap verwendet, um Messwerte über die Umweltradioaktivität zu interpolieren [104]. Dabei werden unterschiedliche Semivariogrammmodelle nacheinander mit Hilfe eines Semivariogrammschätzers in einem iterativen Prozess an das experimentelle Semivariogramm angepasst und der Schätzfehler bestimmt. Schlägt dieser Prozess fehl, kann das getestete Modell aus der Liste der potenziellen Kandidaten entfernt werden. Unter den verbleibenden Modellen wird das ausgewählt, welches den geringsten Schätzfehler aufweist und somit am besten an das experimentelle Semivariogramm approximiert wird. Hierfür werden die vier genannten Semivariogrammmodelle zusammen mit den entsprechenden Messwerten an die entsprechende Methode übergeben. Als initiale Parameter (vgl. Abschnitt 4.4.3.1) wird als Range 35% der Länge der Diagonalen des jeweiligen Untersuchungsgebietes und als Sill wird der Durchschnitt aus der höchsten Semivarianz des experimentellen Semivariogramms und dem Median der Semivarianzen verwendet. Der Nugget wird auf 0 gesetzt, da davon auszugehen ist, dass die Semivarianz bei minimalem Abstand der Messwerte ebenfalls minimal bzw. gleich 0 ist.

Im Folgenden wird die Umsetzung der verwendeten Interpolationsvarianten vorgestellt. Die erstellten Semivariogramme können dabei sowohl für die Punktinterpolation auf dem Straßennetz als auch für die Rasterinterpolation verwendet werden.

Punktinterpolation: Bei dieser Interpolationsvariante werden die Schadstoffkonzentrationen auf ein Straßennetz abgebildet. Das jeweilige Straßennetz wird aus dem OSM Projekt extrahiert und dient als Basis für die Interpolation. Hierzu werden die einzelnen Straßen in gleich große Segmente unterteilt und an den entsprechenden Stellen Zwischenpunkte eingefügt. Anschließend wird ausgehend von den Endpunkten und den neu hinzugekommenen Zwischenpunkten die Schadstoffkonzentration zusammen mit der Varianz mit Hilfe des lokalen Ordinary Kriging aus Abschnitt 4.4.3.2 interpoliert. Für die entstandenen Segmente der Straße werden die Koordinaten der sich berührenden Punkte berechnet und stellen somit die Positionen dar, an denen die Schadstoffwerte anhand der vorhandenen Messwerte geschätzt werden.

Bei der Punktinterpolation auf dem Straßennetz entsteht durch dessen Nutzung eine zusätzliche Datenabhängigkeit, da die Informationen der Straßensegmente zur Berechnung der zu interpolierenden Punkte benötigt werden. Die zusätzlichen Synchronisationspunkte können sich dabei negativ auf die Performanz im Zusammenhang mit der Parallelisierbarkeit auswirken. Hierbei werden nur jene Punkte interpoliert, die das Straßennetz beschreiben, was abhängig von dessen Größe Vorteile bringen kann. Die straßengenauen Informationen über die Schadstoffbelastung eignen sich insbesondere für die Nutzung in Verbindung mit verkehrsrelevanten Anwendungen, wobei eine Möglichkeit in Abschnitt 5.4.2.2 genauer beschrieben wird. Eine über den Verkehrsbereich hinausgehende Nutzung dieser Informationen, beispielsweise als Planungsgrundlage für Umweltzonen, ist allerdings nur bedingt möglich. Dies ist auch einer der Nachteile dieser Variante, da keine flächendeckenden Daten über die Luftqualität in Wohn- oder Industriegebieten berechnet werden. Außerdem ist die Punktinterpolation anfälliger gegenüber extremen Messwerten und kann zu verhältnismäßig großen Sprüngen in den interpolierten Messwerten führen. Zur Erzeugung flächendeckender Umweltdaten kann,

als Alternative zur Interpolation auf dem Straßennetz, die Komponente zur Rasterinterpolation verwendet werden, die im Folgenden erläutert wird.

Rasterinterpolation: In diesem Fall wird die Luftverschmutzung in Form einer Rasterkarte für das gesamte zu untersuchende Gebiet erstellt. Hierbei wird das Gebiet in ein Raster mit fester Zellgröße aufgeteilt und für jede der entstandenen Zellen ein lokales Block Kriging (vgl. Abschnitt 4.4.3.3) durchgeführt. Diese Art der Interpolation wird mit Hilfe eines Rasterblocks aus der Datenbank realisiert, dem neben den Koordinaten der linken oberen Ecke auch die Höhe und Breite sowie die Anzahl der vertikalen und horizontalen Pixel zugeordnet sind. Anschließend wird ein Gitter über die Mittelpunkte der einzelnen Pixel gelegt, die wiederum die zu interpolierenden Punkte repräsentieren. Zur Interpolation muss das Gitter zusätzlich in eine UTM Projektion transformiert werden, so dass sowohl das Gitter als auch die tatsächlichen Messwerte das gleiche Koordinatensystem aufweisen. Im Anschluss an die Interpolation können die geschätzten Messwerte wieder in Form eines Rasterblocks in der Datenbank abgelegt werden.

Mit diesem Verfahren können für das gesamte Gebiet unabhängig von der Bebauung oder Nutzung, Umweltinformationen bezüglich der Luftverschmutzung zur Verfügung gestellt werden. Darin liegt auch der wesentliche Vorteil der Blockinterpolation, da die berechneten Informationen über die Schadstoffkonzentration vielseitiger eingesetzt und verwendet werden können. Eine solche Informationsquelle kann beispielsweise als Planungsgrundlage für Umweltzonen oder für Studien im medizinischen Bereich herangezogen werden. Ausgestattet mit einem GPS Empfänger, kann die zurückgelegte Strecke eines Probanden im Laufe des Tages erfasst werden, wobei mit den vorliegenden Daten die Schadstoffbelastung, der dieser ausgesetzt war, mit einem sehr hohen Detailgrad festgestellt werden kann. Ein vergleichbarer Ansatz wird in [51] beschrieben.

Visualisierung der Daten

Im Rahmen eines Dienstes auf der Anwendungsschicht können die kollaborativ gewonnen Daten visuell aufbereitet werden. Die Visualisierung kann abhängig vom Interpolationsverfahren auf unterschiedliche Weise erfolgen, wobei zu Darstellungszwecken auch die zur Verfügung stehende Rechenleistung eine wesentliche Rolle spielt. Abhängig vom Einsatzzweck werden im Folgenden drei verschiedene Verfahren vorgestellt, mit denen die zuvor berechneten Umweltdaten veranschaulicht werden können. Die erste Möglichkeit erlaubt die Aufbereitung sowohl auf Basis Punktinterpolation als auch auf Basis der Rasterinterpolation, wohingegen die anderen beiden Möglichkeiten lediglich die Ergebnisse der Rasterinterpolation zur Visualisierung verwenden.

Schadstoffinformationen auf Straßen: Die erste Möglichkeit zur Visualisierung auf Basis des Straßennetzes nutzt die Ergebnisse der Punktinterpolation, wobei dieses als monochromes oder farbiges Bitmap gerendert wird. Hierbei können die Farbinformationen direkt aus den Interpolationsergebnissen mit Hilfe einer Funktion des Ortes abgeleitet werden. Jeder Straßenzug setzt sich dabei aus einzelnen Straßensegmenten zusammen und hat einen Startpunkt p_s , einen Endpunkt p_e und eine Länge l . Die Funktion $p : [0, l] \rightarrow \mathbb{R}^2$ beschreibt die Koordinaten für jeden Punkt mit der Distanz. Die Expositionsfunktion des

Ortes $E_s : [0, l] \rightarrow \mathbb{R}$ bildet dabei die jeweilige Exposition für jeden Punkt der einzelnen Straßensegmente ab. Sofern die Interpolationsergebnisse bereits als Punktdaten vorliegen, können diese verwendet werden, um die diskrete Funktion $E_s(l)$ anzugeben. Liegen im Gegensatz dazu die Interpolationsergebnisse als Rasterdaten vor, so müssen zunächst die Schadstoffkonzentrationen anhand der Koordinaten der Straßensegmente abgebildet werden. Dabei handelt es sich um eine diskrete Realisierung des Skalarfeldes $h : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Zu diesem Zweck werden die Rasterdaten mit Hilfe einer datenbankbasierten Schnittoperation auf die entsprechenden Straßensegmente abgebildet, wie in Abbildung 5.51 veranschaulicht. Nach der Komposition $h \circ p$ ergibt sich schließlich ebenfalls die Funktion $E_s(l)$. Somit kann unabhängig vom zugrunde liegenden Interpolationsverfahren für jeden Streckenabschnitt die Schadstoffkonzentration bzw. dessen Farbkodierung mit Hilfe der Funktion des Ortes bestimmt werden. Auf diese Weise kann entweder ein kompletter Straßenzug basierend auf den jeweiligen Schadstoffwerten eingefärbt werden, wobei diese über die Länge der Straße normiert werden, da ansonsten längeren Straßen eine deutlich höhere Belastung zugeordnet wird (vgl. Abbildungen 5.52b und 5.53b) oder die Farbkodierung erfolgt für jedes einzelne Straßensegment (vgl. Abbildungen 5.52a und 5.53a). Für die feingranulare Darstellung wird der Farbwert des Messwertes jeweils der Hälfte der abgehenden Segmente zugeordnet.

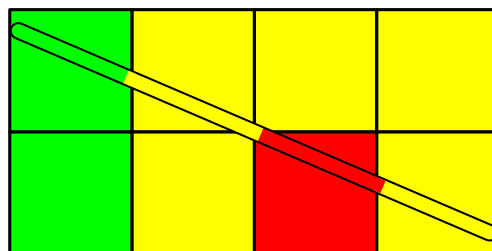


Abbildung 5.51: Abbildung der Rasterdaten auf Straßensegmente

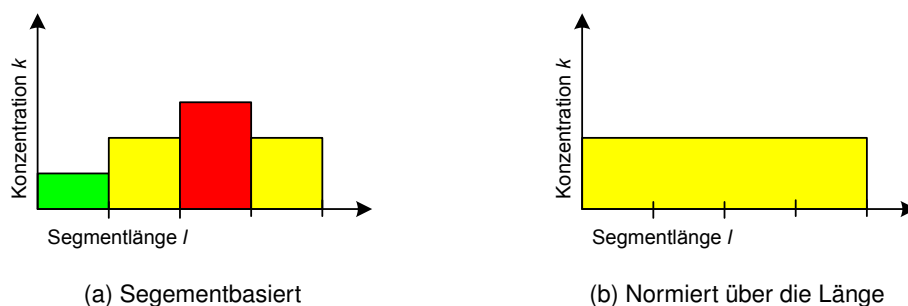

Abbildung 5.52: Funktion des Ortes $E_s(l)$


Abbildung 5.53: Farbkodierung basierend auf der Funktion des Ortes

Im Vergleich zur ersten Variante erfordert die Einfärbung einzelner Segmente wesentlich mehr Rechenleistung, liefert aber dafür eine detaillierte Visualisierung. Wie bereits angedeutet,

müssen den jeweiligen Schadstoffkonzentrationen entsprechende Farb- oder Monochromwerte zugewiesen werden, die in einer statischen Tabelle abhängig von der Art des Schadstoffes definiert sind. Eine solche Tabelle ist notwendig, da die unterschiedlichen Schadstoffarten ver-

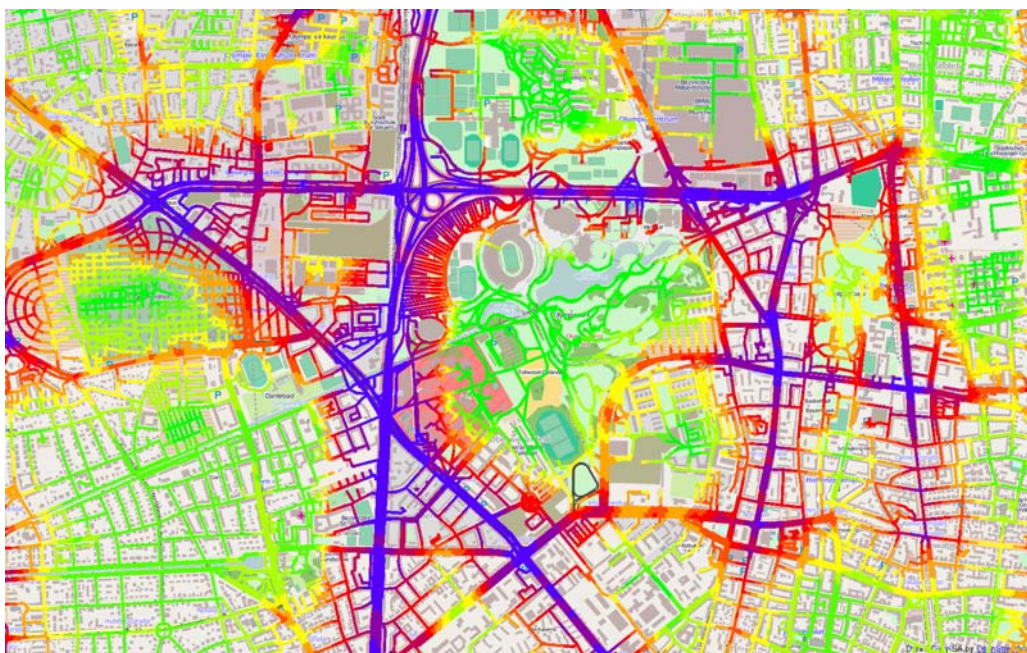


Abbildung 5.54: Darstellung eines farbkodierten Straßennetzes als Overlay über einer OSM Karte

schiedene Wertebereiche bezüglich einer hohen bzw. niedrigen Belastung besitzen. Sofern keine Informationen über den schadstoffbezogenen Wertebereich, beispielsweise in Form gesetzlicher Grenzwerte, zur Verfügung stehen, kann dieser auch unter Verwendung der niedrigsten und der größten vorkommenden Schadstoffkonzentration im gesamten Datenbestand bestimmt werden. Abbildung 5.54 zeigt das Ergebnis der farblichen Visualisierung von Schadstoffinformationen auf Straßen, in der der Olympiapark in München und die benachbarten Stadtviertel zu sehen sind. Die Zuweisung der Farbwerte erfolgt hierbei auf Basis einzelner Segmente, wobei grüne Straßen eine geringe Schadstoffkonzentration aufweisen. Gelbe Straßen haben eine mittlere und rote eine hohe Schadstoffbelastung. Die blau gekennzeichneten Straßensegmente weisen hierbei die höchste Konzentration auf.

Schadstoffinformationen als Bitmap: In der Regel werden Rasterdaten in Form von Bitmaps dargestellt, wobei in diesem Fall die interpolierten Messwerte der Gridzellen, wie auch schon bei der Darstellung auf dem Straßennetz, in einen geeigneten Wertebereich abgebildet werden.

Das erstellte Bitmap kann neben der monochromen Darstellung auch eingefärbt werden, so dass beispielsweise eine hohe Schadstoffkonzentration rot und eine niedrige Konzentration grün gekennzeichnet werden kann. Abschließend können die einzelnen Bitmaps zusammengesetzt und als Overlay über eine entsprechende Landkarte gelegt werden. In Abbildung 5.55 sind sowohl eine monochrome als auch eine eingefärbte Visualisierung der Schadstoffkonzentration in Form eines Bitmaps zu sehen.

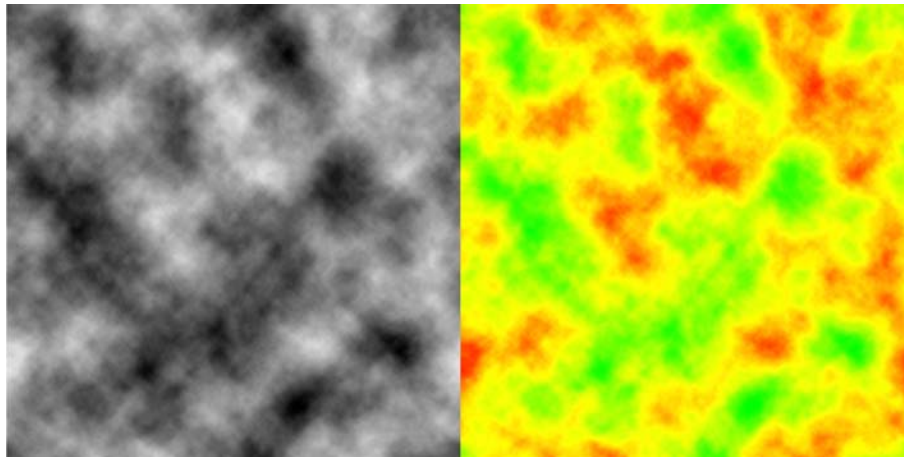


Abbildung 5.55: Darstellung der Schadstoffkonzentration als monochromes und farbkodiertes Bitmap

Schadstoffinformationen als 3D-Modell: Neben der zweidimensionalen Darstellung als Bitmap besteht abhängig von der zur Verfügung stehenden Rechenleistung die Möglichkeit die Schadstoffkonzentration in Form eines 3D-Modells zu visualisieren. Dabei beschreibt der Wert der Schadstoffkonzentration die Höhe und wird auf der z-Achse aufgetragen. Für das Rendering kann hierbei sowohl eine Point Cloud als auch ein Mesh verwendet werden. Abbildung 5.56 zeigt die Werte der Schadstoffkonzentration, die auch die Basis des vorigen Bitmaps bildeten und in diesem Fall mit Hilfe einer Point Cloud erzeugt wurden. Bezüglich

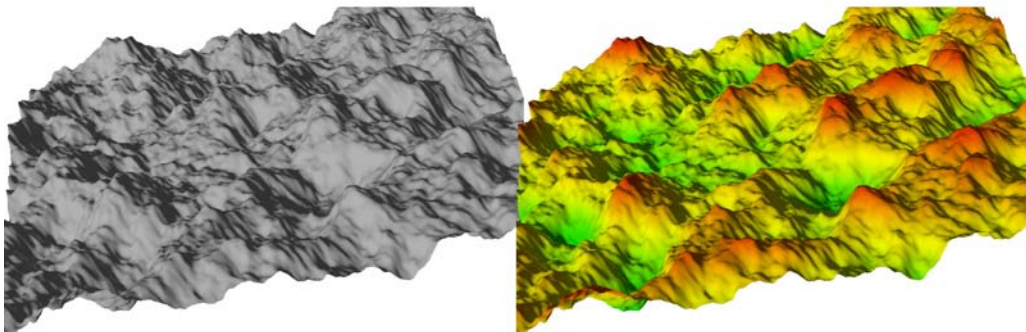


Abbildung 5.56: Darstellung der Schadstoffkonzentration als 3D Point Cloud, monochrom und farbkodiert

der notwendigen Rechenleistung wirkt sich diese Darstellungsart jedoch nachteilig auf die Performanz aus. Zwar kann dieser Prozess durch 3D-Berechnungen moderner Grafikkarten unterstützt werden, aber die Nutzung dieser Darstellungsform für die Echtzeitfunktionalität erscheint derzeit noch ungeeignet.

Die Erzeugung der Schadstoffkarten, die aus Gründen der Performanz auf die Darstellung von kompletten Straßenzügen auf Basis der Punktinterpolation und auf zweidimensionale Bitmaps bezüglich der Rasterinterpolation beschränkt wurde, wird mit Hilfe von MapServer [220] durchgeführt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um ein Modul zum Rendering von geografischen Daten, das neben Vektor- und Rasterdaten auch zahlreiche Standards des

Open Geospatial Consortiums (OGC) [232], Entwicklungsumgebungen und unterschiedliche Plattformen unterstützt. Die eigentliche Darstellung der erzeugten Kartenausschnitte erfolgt mit Hilfe von OpenLayers [233], wobei es sich um eine clientseitige Webanwendung handelt, die in JavaScript entwickelt wurde und im Browser des Benutzers ausgeführt wird. Die Ausschnitte in Form von Kacheln oder Tiles werden im gewählten Zoomlevel über konfigurierbare Datenquellen zur Verfügung gestellt und lassen sich als separate Layer darstellen. Im Rahmen des hier vorgestellten Systems können damit sowohl die vom MapServer gerenderten Schadstoffkacheln angezeigt als auch mit entsprechenden Straßenkarten, beispielsweise von OSM, hinterlegt werden. Für eine genauere Beschreibung der genannten Komponenten sei auf die jeweiligen Dokumentationen verwiesen.

5.4.1.2 Evaluierung

Das beschriebene System wurde prototypisch für das Stadtgebiet München implementiert und bezüglich der Performanz der vorgestellten Interpolationsverfahren verglichen, um Aussagen über die Skalierbarkeit zu treffen.

Das System basiert auf der ubiquitären Verfügbarkeit von Messwerten, die in großer Anzahl von mobilen und stationären Entitäten zur Verfügung gestellt werden. Da diese Informationen allerdings nicht in ausreichender Anzahl zur Verfügung standen, wurden zur Evaluierung synthetische Messwerte mit Hilfe der in Abschnitt 4.4.4 vorgestellten Land Use Regression generiert. Hierbei wurde das Modell aus [26] anhand der verfügbaren Informationen angepasst, wobei das Straßennetz Münchens als Grundlage aus dem OSM Projekt extrahiert wurde. Basierend auf den dort definierten Straßentypen und der Anzahl der modellierten Fahrspuren wurden Annahmen über die Verkehrsdichte getroffen. Die Höhe über Normal Null für das entsprechende Gebiet wurde aus den Daten der Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) unter Verwendung des Global Digital Elevation Model (GDEM) [176] in die PostgreSQL Datenbank importiert. Schließlich wurde das folgende Modell zur Generierung der verwendeten NO_2 Daten verwendet:

$$\mu(NO_2) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (15 \cdot TD_{0-40} + TD_{40-300}) + \beta_2 \cdot \log_{10}(Alt)$$

Dabei beschreibt TD_{n-m} die Verkehrsdichte in einem Gebiet zwischen n und m Metern um den jeweiligen Messpunkt. β_0 - β_2 sind Parameter zur Gewichtung, die im Wesentlichen den Werten in [25] entsprechen und in Huddersfield, England verwendet wurden. Der Parameter β_1 wurde so angepasst, dass realistische Werte erzeugt werden konnten, die mit den frei zugänglichen Daten des Bundesumweltamtes [186] vergleichbar sind. Als Parameter für die Erzeugung von 100.000 Messwerten wurden die folgenden Werte verwendet: $\beta_0 = 38,52$, $\beta_1 = 0,0003705$ und $\beta_2 = -5,673$.

Analyse der Interpolationsverfahren

Das System unterstützt die zwei beschriebenen Interpolationsverfahren, die im Folgenden bezüglich der berechneten Schadstoffkonzentrationen gegenübergestellt werden. Der Vergleich der Punktinterpolation (k_{Punkt}) mit der Rasterinterpolation (k_{Raster}) wurde auf dem Straßennetz durchgeführt, bei dem für jedes Wegsegment das Verhältnis q in Form des Quotienten $\frac{k_{Raster}}{k_{Punkt}}$ gebildet wurde. Bei der Punktinterpolation liegen die notwendigen Informationen für das

Straßennetz bereits vor, wohingegen die Ergebnisse der Rasterinterpolation, wie auch schon bei der Visualisierung, auf die Straßendaten mit Hilfe der Funktion des Ortes abgebildet werden müssen. Zur Untersuchung wurden die Abstände von 15, 25, 35, 45, 55, und 75 Metern vom Messwert verwendet, wobei die jeweiligen Ergebnisse in Tabelle 5.7 aufgeführt sind. Die

Abstand d [m]	Min	Max	μ	σ	\varnothing Segmentlänge [m]
15	0,654	1,558	0,9995	0,0120	12,03
25	0,657	1,558	0,9995	0,0120	18,09
35	0,659	1,558	0,9993	0,0122	23,28
45	0,662	1,558	0,9993	0,0123	27,91
55	0,662	1,558	0,9992	0,0125	31,92
75	0,660	1,558	0,9991	0,0130	35,47

Tabelle 5.7: Minimum, Maximum, Mittelwert μ und Standardabweichung σ von q

Mittelwerte für q liegen dabei sehr nahe beim idealen Wert von 1,0 und lassen den Schluss zu, dass beide Interpolationsverfahren annähernd gleiche Ergebnisse liefern. Die sehr geringe Standardabweichung liegt zwischen 0,0120 bei 15 Metern und 0,0130 bei 75 Meter, so dass die Werte beider Verfahren bei 99% der Segmente um weniger als 5% abweichen. Die Performanz bezüglich der Interpolation hängt stark von der verfügbaren Rechenkapazität ab, wobei die relativen Veränderungen auf die Skalierbarkeit der Ansätze hindeuten.

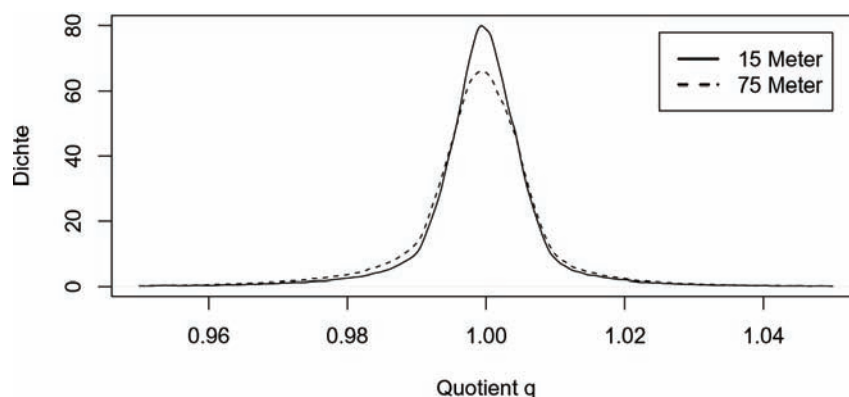


Abbildung 5.57: Verteilungsfunktionen von q für 15 und 75 Meter Abstand

Zusätzlich wurde die durchschnittliche Anzahl von Messwerten pro Straße berechnet, wobei die zugehörige Verteilungsfunktion in Abbildung 5.57 mit den Abständen von 15 und 75 Metern dargestellt ist. Dabei führt eine Erhöhung des Abstands auf über 75 Meter zu einer unterproportional steigenden Segmentlänge der Straßen. Für $d = 15$ liegt die Segmentlänge bei ca. 12 Metern, wobei diese mit steigendem d zunimmt und bei $d = 165$ einen durchschnittlichen Wert von rund 58 Metern erreicht. Dabei zeigt sich, dass viele Straßenabschnitte kürzer sind als der Wert von d und daher der Anstieg der durchschnittlichen Segmentlänge ab acht, wie Abbildung 5.58 zeigt.

In Abbildung 5.59a sind die Zeitmessungen unter Verwendung verschiedener Distanzen zwischen den Messpunkten für die Punktinterpolation dargestellt. Mit steigendem Abstand der

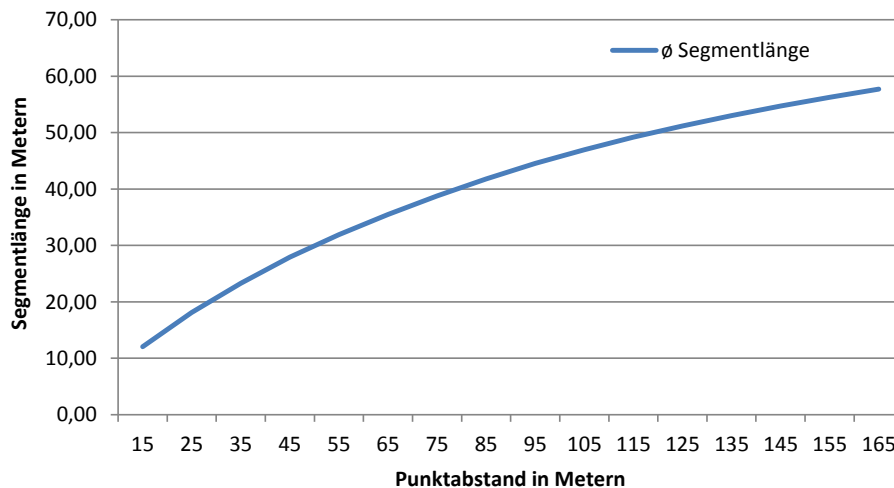
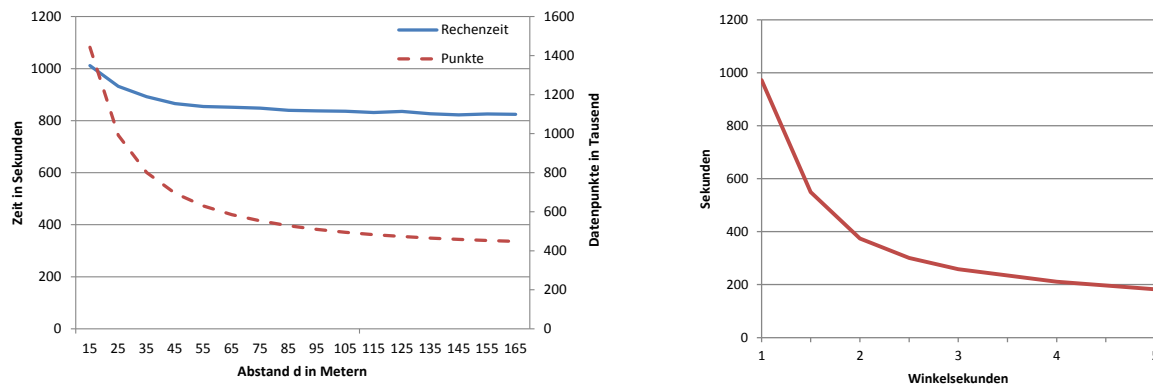


Abbildung 5.58: Vergleich von d und der berechneten durchschnittlichen Segmentlänge

Messpunkte sinkt dabei auch die Anzahl der notwendigen Berechnungen und damit auch die Dauer des Interpolationsprozesses. Die Laufzeit der Punktinterpolation liegt bei einem Abstand von $d = 15$ Metern bei unter 17 Minuten. Mit steigendem Abstand der Messpunkte sinkt die Interpolationszeit auf ca. 13,5 Minuten. Insgesamt sinkt die Anzahl der interpolierten Punkte um fast 70%, wohingegen die benötigte Rechenzeit lediglich um 13% abnimmt. Basierend auf diesen Ergebnissen sollte aus Gründen der Performanz und unter Berücksichtigung der verfügbaren Rechenleistung des genutzten Systems ein Abstand zwischen 35 und 55 Metern gewählt werden, um eine Aktualisierungsrate der Schadstoffkonzentrationen von unter 15 Minuten für das Stadtgebiet München zu gewährleisten. Im Hinblick auf die Genauigkeit der Interpolation sollte der Abstand zwischen den Punkten allerdings auch nicht bei über 55 Metern liegen, da diese im Verhältnis zur Rechenzeit stärker abnimmt.

Die Laufzeit der Rasterinterpolation hängt maßgeblich von der Rastergröße bzw. den darin enthaltenen Messpunkten ab. Zur Bewertung dieses Verfahrens wurden daher Zeitmessungen für Gebiete mit einer Kantenlänge zwischen 1 und 5 Winkelsekunden, aber mit konstanter Anzahl an Messpunkten, durchgeführt. Eine Winkelsekunde des Meridiankreises entspricht dabei etwa 31 Metern. Die Ergebnisse der Laufzeit sind in Abbildung 5.59b dargestellt. Wie auch schon bei der Punktinterpolation, verringert sich die benötigte Rechenzeit mit abnehmender Anzahl der interpolierten Messwerte. Diesbezüglich führt eine Verdoppelung der Kantenlänge zu einer Reduzierung der Pixel um den Faktor 4, wobei die notwendige Rechenzeit nicht quadratisch abnimmt. Bei einer Rastergröße von 1 Winkelsekunde dauert die Interpolation für das Stadtgebiet Münchens 16 Minuten. Bei einer Verdoppelung der Kantenlänge auf 2 Winkelsekunden sinkt die Rechenzeit auf 6 Minuten und somit lediglich um den Faktor 2,6. Ab einem Gebiet von 3 Winkelsekunden ergeben sich nur noch geringe Verbesserungen bezüglich der Laufzeit, die bei 5 Winkelsekunden ca. 3 Minuten beträgt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Hilfe der Rasterinterpolation im Vergleich zur Punktinterpolation umfassendere Aussagen über ein flächendeckendes Gebiet gemacht und die Ergebnisse flexibler für unterschiedliche Domänen eingesetzt werden können. Dabei ist der Mehraufwand an Rechenleistung im Vergleich zur Qualität durchaus vertretbar. Die



(a) Punktinterpolation mit unterschiedlichen Abständen

(b) Rasterinterpolation mit unterschiedlicher Gebietsgröße

Abbildung 5.59: Skalierbarkeit der Punkt- und Rasterinterpolation

Punktinterpolation auf dem Straßennetz ist insbesondere für die Verkehrsdomäne relevant und für entsprechende Anwendungen geeignet, da dieses Verfahren im Vergleich zur Rasterinterpolation vergleichbare Ergebnisse bei geringerem Rechenaufwand liefert.

5.4.2 Der gesunde Weg: Eine Anwendung auf Basis von Umweltinformationen

In diesem Abschnitt wird eine Anwendung vorgestellt, die auf Basis des Systems zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen unterschiedliche Routen unter Berücksichtigung der aktuellen Schadstoffkonzentration berechnen kann. Die Anwendung ist somit im Rahmen dieser Arbeit den Reiseinformationssystemen aus Abschnitt 5.1 zuzuordnen, wobei hiermit ein Beispiel zur flexiblen und weiteren Nutzung des zuvor vorgestellten Systems gegeben wird. Das Ziel der Anwendung ist die Berechnung einer Route, bei der die Schadstoffexposition mini-

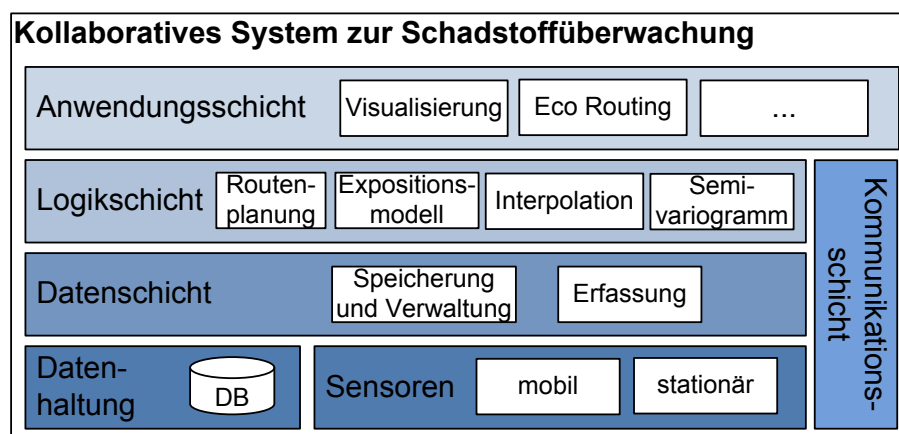


Abbildung 5.60: Erweiterte Systemarchitektur für die schadstoffbasierte Routenplanung

miert wird, welcher der Benutzer ausgesetzt ist. Hierfür werden zwei zusätzliche Komponenten der Logikschicht hinzugefügt. Zum einen handelt es sich um ein Modell zur Bestimmung der Belastung für den Benutzer und zum anderen wird eine Komponente zur Routenplanung be-

nötigt, die das entsprechende Modell für die Berechnung verwendet. Die erweiterte Architektur des Systems ist in Abbildung 5.60 dargestellt. Basierend auf diesen zusätzlichen Komponenten und unter Nutzung der vom System interpolierten Schadstoffkonzentrationen, kann auf der Anwendungsschicht ein Eco Routing Dienst realisiert werden.

5.4.2.1 Expositionsmodell

Dieses Modell bildet die Grundlage für die Berechnung der Schadstoffexposition eines Verkehrsteilnehmers, der sich auf dem Straßen- bzw. Wegenetz bewegt. Die Grundlage des Modells bildet die Punktinterpolation auf dem Straßennetz des Umweltüberwachungssystems. Jedoch können hierfür auch die interpolierten Schadstoffwerte der Rasterinterpolation verwendet werden, wobei wie bei der Visualisierung bzw. beim Vergleich der Interpolationsverfahren vorgegangen wird.

Zur Bestimmung der Exposition wird ein Modell verwendet, bei dem die Grundannahme darin besteht, dass sich die Exposition eines Verkehrsteilnehmers proportional zur Schadstoffkonzentration der einzelnen Streckenabschnitte und der Zeit, die zum Passieren dieser notwendig ist, verhält. Somit kann die Exposition E als Summe der Schadstoffkonzentration k_i und dem Zeitintervall Δt_i der Aussetzung für die jeweiligen Streckenabschnitte i modelliert werden:

$$E = \sum_i (k_i \cdot \Delta t_i) \quad (5.6)$$

Liegen kontinuierliche Daten vor, kann die Exposition unter Verwendung des Integrals modelliert werden.

$$E = \int_0^T k(t) dt \quad (5.7)$$

Unterschiedliche Schadstoffarten werden in diesem Zusammenhang getrennt voneinander betrachtet. Denkbar wäre hierbei allerdings auch deren Kombination, die ebenfalls mit diesem Modell berücksichtigt werden kann. Hierfür muss jeweils ein geeigneter Gewichtungsfaktor unter Berücksichtigung der Schädlichkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Konzentration hinzugefügt werden. Im Folgenden werden lediglich die Werte für NO_2 verwendet, die bereits im Rahmen der Analyse des Systems zur Umweltüberwachung erzeugt wurden.

Zunächst wird auf die Funktion zur Visualisierung zurückgegriffen, mit der für jedes einzelne Streckensegment die entsprechende Schadstoffkonzentration bestimmt werden kann. Die Routenplanung für einen gesunden Weg hängt allerdings maßgeblich von der Geschwindigkeit bzw. der Fahrzeit ab, weshalb im zweiten Schritt aus der Funktion des Ortes eine Funktion der Zeit abgeleitet wird. Diese kann schließlich zur Berücksichtigung der Gesamtexposition bei der Routenplanung verwendet werden. Im diskreten Fall wird die Strecke, wie auch schon bei der Interpolation, in gleich lange Straßensegmente unterteilt. Abbildung 5.61 greift die Funktion des Ortes,

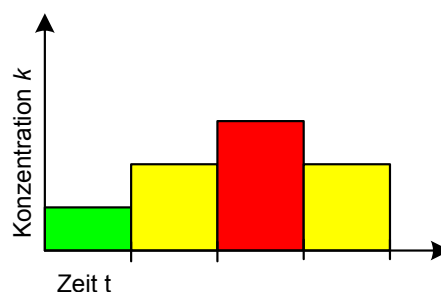


Abbildung 5.61: Funktion des Ortes mit konstanter Geschwindigkeit

die zur Visualisierung verwendet wurde, wieder auf, wobei im einfachsten Fall die einzelnen Segmente mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden und somit innerhalb gleicher Zeitintervalle passiert werden. Die Gesamtexposition eines Verkehrsteilnehmers entspricht dabei den aufsummierten Flächeninhalten des Diagramms. Allerdings ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeit eines Verkehrsteilnehmers und damit auch die Fahrzeit auf den jeweiligen Streckenabschnitten abhängig von den entsprechenden Gegebenheiten variiert. Die Geschwindigkeit muss daher in Abhängigkeit der jeweiligen Streckenabschnitte, beispielsweise auf Basis der erlaubten oder einer theoretischen Durchschnittsgeschwindigkeit aus geeigneten Datenquellen, durch die Funktion $v(s)$ bestimmt werden. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit entweder direkt aus den OSM Daten entnommen oder anhand des Straßentyps festgelegt. Um die Position s des jeweiligen Streckenabschnitts ausgehend von der Fahrzeit t seit dem Auffahren oder Betreten zu bestimmen, muss die Funktion $s(t)$ abgeleitet werden. Mit $v(s) = \frac{ds}{dt}$ folgt [131]:

$$dt = \frac{ds}{v(s)} \Rightarrow t(s) = t_0 + \int_0^s \frac{d\bar{s}}{v(\bar{s})} \quad (5.8)$$

Die gesuchte Funktion $s(t)$ entspricht der Umkehrfunktion von $t(s)$, die stetig und monoton wachsend ist und somit existiert. Die Stetigkeit ergibt sich dadurch, dass die einzelnen Abschnitte der Strecke in endlicher Zeit zurückgelegt werden, wodurch die durchschnittliche Geschwindigkeit $v > 0$ sein muss. Da ein Verkehrsteilnehmer für die Bewegung immer Zeit benötigt, die grundsätzlich vorwärts läuft, ist auch die Monotonie gewährleistet. Wird eine konstante Geschwindigkeit $v(s) = v_{konstant}$ angenommen, so ergibt sich $s(t)$ durch: $s(t) = v_{const} \cdot t$. Nachdem die Schadstoffkonzentration für jeden Punkt einer Strecke mit der Funktion des Ortes $E_s(s)$ bekannt ist, ergibt sich die Exposition $E_t(t)$ anhängig von der Fahrzeit aus der Komposition $E_s \circ s(t)$:

$$E_t(t) = E_s(s(t)) = E_s(v_{const} \cdot t) \quad (5.9)$$

Unter Berücksichtigung des ursprünglichen Modells aus Formel 5.6, entspricht die Schadstoffkonzentration k_i der Exposition in Abhängigkeit der Fahrzeit:

$$E = \sum_i \Delta t_i \cdot E_t(i) \quad (5.10)$$

Dabei ist t_i die Fahrzeit des Streckenabschnitts i und $E_t(i)$ der diesem zugeordnete Expositionswert. Wegen der konstanten Geschwindigkeit und da s und t direkt proportional sind, kann die Exposition auch über E_s berechnet werden:

$$E = \frac{1}{v} E_{k_i}, \quad E_{k_i} = \sum_i \Delta s_i \cdot E_s(i) \quad (5.11)$$

Ein Vorteil hierbei ist, dass die Summe E_k bereits vor der Routenplanung berechnet und in der Datenbank abgelegt werden kann, ohne die Geschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers auf dem jeweiligen Streckenabschnitt zu kennen. Der Expositionswert E für die einzelnen Streckenabschnitte kann bei Bedarf und abhängig vom Fahrzeugprofil, beispielsweise für ein Auto oder ein Fahrrad, durch einfache Division der entsprechenden Geschwindigkeit berechnet werden. Somit können die mit dem Modell berechneten Werte für eine Routenplanung unter Berücksichtigung der Schadstoffexposition verwendet werden.

5.4.2.2 Routenplanung basierend auf Schadstoffinformationen

Die vom Modell zur Verfügung gestellten Expositionswerte werden von der Komponente zur Routenplanung genutzt, um eine Berechnung basierend auf Schadstoffinformationen durchzuführen. Hierbei werden die Expositionswerte als Gewichte verwendet, um den Straßengraphen $G(V, E, \omega_E)$ zu modellieren, der im Anschluss von einem Verfahren zur Berechnung der kürzesten Wege (vgl. Abschnitt 4.3.1.1) verwendet wird.

Kantengewichtung und Routenplanung

Üblicherweise werden zur Berechnung der kürzesten oder schnellsten Route entweder die Länge der Straßenabschnitte oder die dort erlaubte Geschwindigkeit berücksichtigt. Je nach verfügbaren Informationen können auch weitere Parameter, wie die Verkehrsdichte, die anfallenden Mautgebühren oder persönliche Präferenzen in Form bestimmter Straßentypen, in Betracht gezogen werden. In diesem Fall stehen die verfügbaren Expositionswerte im Vordergrund, wobei die Schadstoffbelastung für den Verkehrsteilnehmer minimiert werden soll.

Zur Berechnung der kürzesten Route liegt das Kantengewicht $\omega_{E_{\text{kurz}}}$ durch das Expositionsmodell vor und kann direkt verwendet werden. Dabei ist der Expositionswert E_k unabhängig von der Geschwindigkeit und basiert auf der Länge der einzelnen Straßensegmente. Im Gegensatz hierzu muss zur Berechnung der schnellsten Route das Kantengewicht $\omega_{E_{\text{schnell}}}$ noch durch die mögliche bzw. erlaubte Geschwindigkeit des jeweiligen Straßenabschnitts dividiert werden und entspricht dem Wert von $E = \frac{1}{v} E_k$.

Neben den geografischen Informationen über die Länge der Straßenabschnitte bieten die OSM Daten teilweise auch Geschwindigkeitsangaben oder zumindest den Straßentyp, anhand dessen die erlaubte Geschwindigkeit abgeleitet werden kann. Dadurch können die folgenden Optimierungsstrategien bei der Routenberechnung umgesetzt werden:

1. kürzeste Route: Optimierung der Länge der Strecke
2. schnellste Route: Optimierung der Fahrzeit
3. kürzeste Route mit Expositionsdaten: Optimierung der durchschnittlichen Schadstoffexposition
4. schnellste Route mit Expositionsdaten: Optimierung nach der Gesamtexposition

Zur Berechnung der entsprechenden Routen wird, wie auch bei der Simulationsumgebung aus Abschnitt 5.3.2, pgRouting verwendet, wobei der angebotene A* Algorithmus zur Nutzung der Expositionsdaten angepasst wurde.

Neben der eigentlichen Berechnung wird auch ein Dienst für den Benutzer auf der Anwendungsebene bereitgestellt. Neben einem Start- und Zielpunkt der zu berechnenden Route kann dabei auch ein Fahrzeugprofil sowie eines der vier Verfahren zur Routenberechnung ausgewählt werden. Dem Fahrzeugprofil Fahrrad ist dabei eine konstante Geschwindigkeit von 16 km/h zugewiesen, wohingegen beim Auto die Geschwindigkeit vom Straßentyp bzw. der darauf erlaubten Geschwindigkeit abhängt und nicht explizit begrenzt wurde. Die Komponente zur Routenberechnung liefert im Anschluss eine geordnete Liste von WKT Daten, die die berechnete Route in Form von Straßenabschnitten beschreibt und mit Hilfe von OpenLayers über eine Karte des Straßennetzes gelegt wird. Im folgenden Abschnitt wird die vorgestellte Anwendung auf Basis des Systems zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen analysiert.

5.4.2.3 Evaluierung der Routenplanung basierend auf Schadstoffinformationen

Zur Untersuchung der Anwendung werden die Ergebnisse der Routenberechnung auf Basis der Schadstoffbelastung mit denen der herkömmlichen Pedanten verglichen. Hierzu werden neben der Länge der Route und der Fahrzeit auch die Gesamtexposition durch die jeweiligen Verfahren bestimmt. Für die Analyse wurden 55 Start- bzw. Endpunkte im Stadtgebiet München ausgewählt, die in Abbildung 5.62 dargestellt sind. Bei der Auswahl dieser Punkte wurde eine gute Erreichbarkeit sowohl mit dem Auto als auch mit dem Fahrrad berücksichtigt.

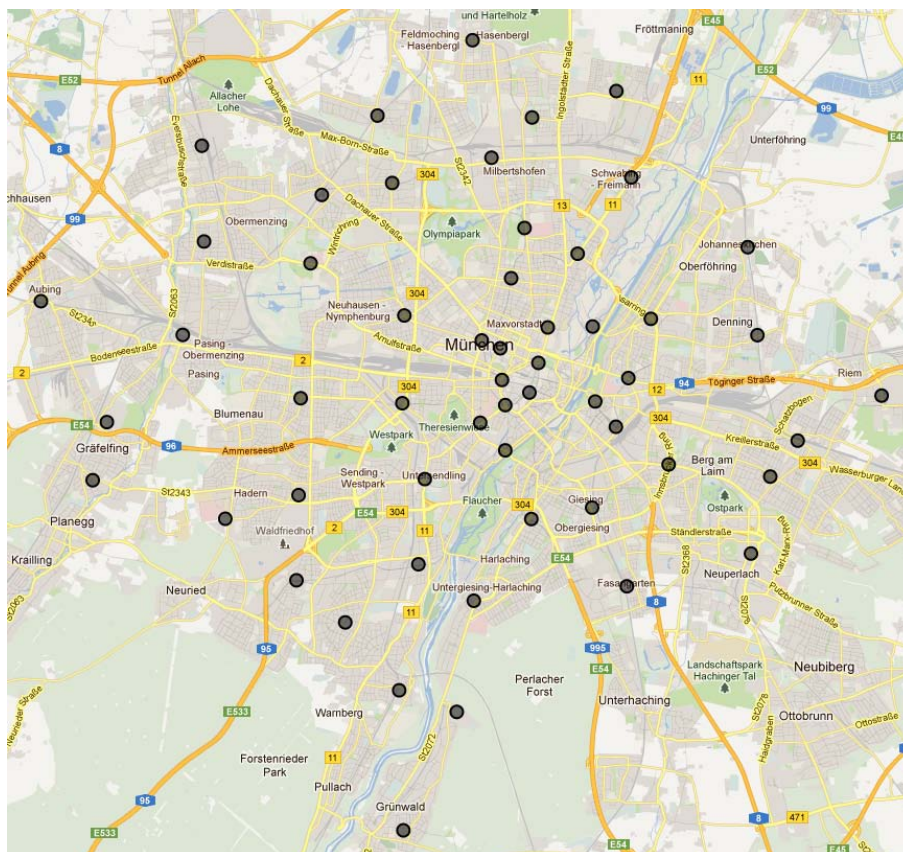


Abbildung 5.62: Start- bzw. Zielpunkte zur Untersuchung der schadstoffbasierten Routenplanung

Nachdem bei der Routenberechnung unter Verwendung des Profils Fahrrad auf Grund der begrenzten Geschwindigkeit die kürzeste der schnellsten Route entspricht, wurde lediglich für letztere die Analyse durchgeführt. Somit wurden insgesamt 6 Routen von jedem Punkt zu allen anderen Punkten und damit 17.820 Routen berechnet:

- Je zwei Routen für Autofahrer mit der kürzesten Strecke mit und ohne Verwendung der Schadstoffinformationen
- Je zwei Routen für Autofahrer mit der schnellsten Strecke mit und ohne Verwendung der Schadstoffinformationen
- Je zwei Routen für Fahrradfahrer mit der schnellsten Strecke mit und ohne Verwendung der Schadstoffinformationen

Die Grundlage in Form der Schadstoffwerte basiert in diesem Fall auf den Ergebnissen der Rasterinterpolation und der anschließenden Abbildung auf das Straßennetz Münchens.

Für den Vergleich der unterschiedlichen Strategien zur Routenberechnung wurden die relativen Unterschiede in Form eines Quotienten q der Streckenlänge d , der Fahrzeit t und der Schadstoffexposition e bestimmt:

$$q := \frac{r_{\text{schadstoff}} - r_{\text{normal}}}{r_{\text{normal}}} = \frac{r_{\text{schadstoff}}}{r_{\text{normal}}} - 1 \quad (5.12)$$

Hierbei wurden jeweils die durchschnittlichen Ergebnisse sowohl der schadstoffbasierten Routenberechnungen $r_{\text{schadstoff}}$ als auch der herkömmlichen Routenberechnungen r_{normal} verwendet. Ein negatives Ergebnis bedeutet eine Verringerung bei der Verwendung des Routingverfahrens basierend auf Schadstoffinformationen, wohingegen ein positiver Wert für eine Verringerung für die herkömmlichen Verfahren steht. Tabelle 5.8 zeigt die statistischen Kennzahlen für die drei unterschiedlichen Strategien der Routenberechnung.

Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert μ	Abweichung σ
Auto, kürzeste				
Distanz d	0,000	0,784	0,082	0,068
Fahrzeit t	-0,358	2,388	0,322	0,305
Gesamtexposition e	-0,508	1,416	0,067	0,195
Auto, schnellste				
Distanz d	-0,347	0,560	0,019	0,073
Fahrzeit t	0,000	0,673	0,103	0,097
Gesamtexposition e	-0,407	0,000	-0,086	0,075
Fahrrad, schnellste				
Distanz d	0,000	0,488	0,071	0,057
Fahrzeit t	0,000	0,488	0,071	0,057
Gesamtexposition e	-0,468	0,000	-0,126	0,091

Tabelle 5.8: Statistische Kenngrößen von d_q , t_q und e_q

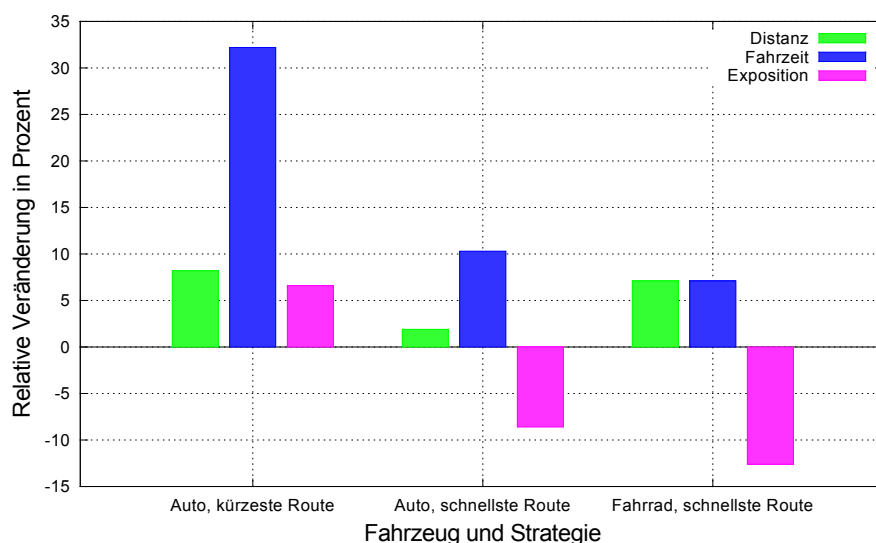


Abbildung 5.63: Vergleich der Parameter mit und ohne Berücksichtigung der Umweltdaten

Bei der kürzesten Route für Autos übertrifft das herkömmliche Routingverfahren den auf

Schadstoffinformationen basierenden Ansatz bei allen betrachteten Größen, wie in Abbildung 5.63 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass sogar die Schadstoffbelastung im Mittel um 6,7% ansteigt. Obwohl die durchschnittliche Schadstoffbelastung trotz einer Verlängerung der Distanz um 8,2% abnimmt, steigt die Gesamtexposition wegen dem Anstieg der Fahrzeit um 32,2%. Daher wurde diese Konfiguration einer genaueren Analyse unterzogen und

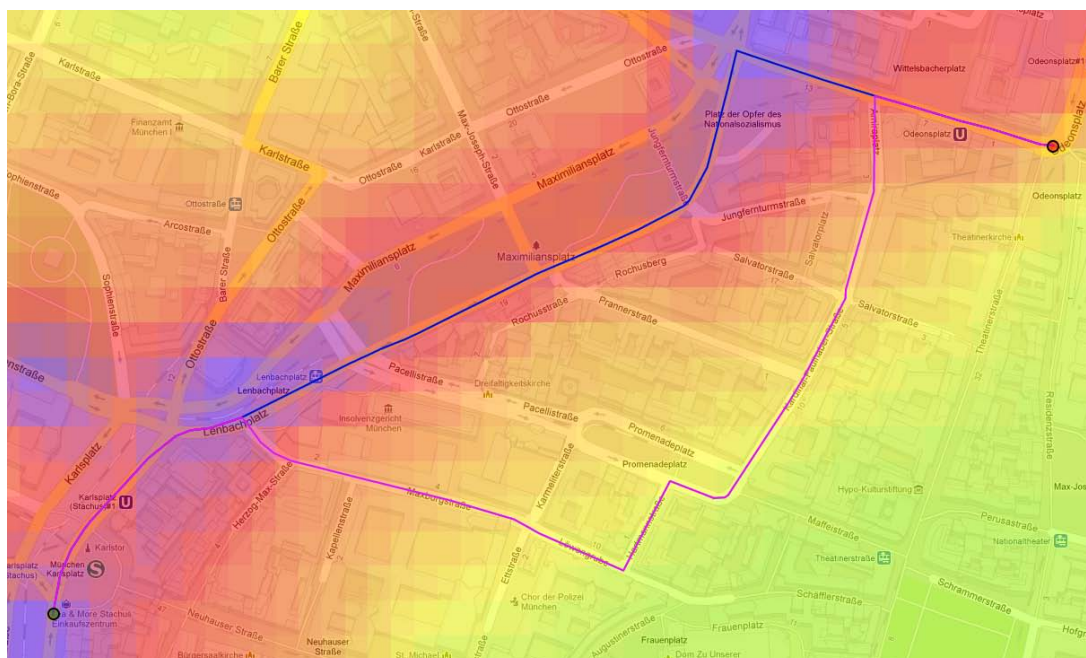


Abbildung 5.64: Berechnete Routen mit und ohne Berücksichtigung der Schadstoffinformationen

Abbildung 5.64 zeigt ein Beispiel für die Berechnung der kürzesten Route eines Autofahrers. Die nördliche blaue Route zeigt die kürzeste Strecke, die mit Hilfe des herkömmlichen Verfahrens berechnet wurde. Die südliche magentafarbene Linie repräsentiert die Route mit der geringsten durchschnittlichen Schadstoffbelastung. Letztere führt dabei nicht entlang der stärker belasteten Hauptstraße, auf der eine höhere Geschwindigkeit möglich ist, sondern verläuft durch die weniger belasteten Seitenstraßen, die gleichzeitig eine wesentlich niedrigere Geschwindigkeit erlauben. Insgesamt verlängert sich hierbei die Distanz der schadstoffärmeren Route um 17% auf 1,33 km. Dabei weist die südliche Route, rein auf die Distanz bezogen, insgesamt eine geringere Belastung auf. Allerdings basiert die Gesamtexposition nach dem Modell auf der Fahrzeit, die in diesem Fall um rund 70%, wegen der für den Autofahrer relevanten Geschwindigkeitsbegrenzungen in den Seitenstraßen, überproportional ansteigt. Bei der Bestimmung der Gesamtexposition unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit, führt dies zu einer Erhöhung der Schadstoffbelastung auf Grund der wesentlich längeren Fahrzeit. Würde man die Geschwindigkeitsbegrenzungen ignorieren, dann würde sich auch für dieses Beispiel eine niedrigere Gesamtexposition ergeben.

Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der schnellsten Routen, dass die Schadstoffbelastung unter Verwendung des schadstoffbasierten Verfahrens um 8,6% deutlich reduziert werden kann. Die gefahrene Distanz nimmt dabei allerdings um 1,9% zu und die Fahrzeit steigt durchschnittlich sogar um 10,3% gegenüber dem herkömmlichen Ansatz. Wie auch schon bei

der kürzesten Route, werden hierbei ebenfalls Routen mit einer geringeren Belastung gewählt, die aber häufig durch kleinere Seitenstraßen mit entsprechenden Geschwindigkeitsbegrenzungen führen.

Im Vergleich zu den Routenberechnungen für Autofahrer spielen für Fahrradfahrer die Geschwindigkeitsbegrenzungen keine Rolle, da die maximale Geschwindigkeit von 16 km/h in der Regel deutlich unter der Begrenzung liegt. Daher zeigen die Ergebnisse bezüglich der Gesamtexposition bei der Verwendung des vorgeschlagenen Ansatzes die stärkste Verringerung, die durchschnittlich bei 12,6% lag. Da hierbei keine Beschränkung durch die Geschwindigkeit vorlag, erhöhten sich sowohl die Fahrzeiten als auch die Distanzen um je 7,1%. Genauere Analysen haben ergeben, dass für 10% der berechneten Routen die Gesamtexposition sogar um 25% reduziert wurde und bei 30% der untersuchten Routen konnte eine Reduzierung bei mindestens 17% erreicht werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen lässt sich zunächst festhalten, dass der Unterschied der beiden Profile in der Geschwindigkeit liegt und entsprechende Auswirkungen auf die davon abhängige Gesamtexposition nach sich zieht. Somit ist eine Routenberechnung basierend auf den Schadstoffinformationen insbesondere dann sinnvoll, wenn ein Verkehrsteilnehmer nicht durch die erlaubte Geschwindigkeit in der Fahrzeit beschränkt wird. Neben Fahrradfahrern bietet die vorgeschlagene Anwendung beispielsweise auch Fußgängern entsprechende Vorteile. Allerdings kann im Gegensatz zu dieser Gruppe von Verkehrsteilnehmern eine schadstoffbasierte Verkehrs umsteuerung des motorisierten Verkehrs zu einer Reduzierung in stark belasteten Gebieten führen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der durch die längere Fahrzeit bedingte zusätzliche Schadstoffausstoß insgesamt nicht zu einer erhöhten Belastung führt.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden eigene Anwendungen und Systeme für jeden der adressierten ITS Bereiche vorgestellt. Im Hinblick auf den Bereich der Reiseinformationen wurde in Abschnitt 5.1.1 zunächst die Umsetzung eines mobilen Routenplaners für öffentliche Verkehrsnetze vorgestellt. Hierbei stand allerdings nicht die Kooperation im Vordergrund, sondern vielmehr die lokale Nutzung und Verarbeitung von Informationen, um die Transparenz im Zusammenhang mit der Nutzung öffentlicher Verkehrsnetze zu verbessern. Durch eine multimodale Routenführung und die kontextabhängige Aktualisierung der Route kann die Attraktivität gesteigert werden, wobei eine verstärkte Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel dazu beiträgt das Verkehrsaufkommen insgesamt zu reduzieren. Für die Umsetzung der mobilen Anwendung wurde sowohl das öffentliche Verkehrsnetz als auch das Straßen- und Wegenetz geeignet modelliert sowie die getakteten Verbindungen entsprechend berücksichtigt. Basierend auf dem multimodalen Verkehrsnetz können Routen von Tür-zu-Tür, inklusive der notwendigen Fußwege, geplant und kontextabhängig aktualisiert werden. Im Zuge der lokalen Ausführung wurde mit Hilfe eines Verfahrens zur Raumpartitionierung den begrenzt verfügbaren Ressourcen auf mobilen Endgeräten Rechnung getragen. Neben der eigentlichen Routenplanung wird der Benutzer insbesondere durch die kontextabhängige Aktualisierung

über mögliche Alternativen informiert, sofern dieser von der ursprünglich geplanten Route abweicht oder, beispielsweise bedingt durch Verspätungen, die entsprechenden Verbindungen nicht genutzt werden können. Im Zusammenhang mit der Aktualisierung anhand von Live Daten muss dabei ein Kompromiss zwischen der Datenaktualität, die eine Verbindung zum Internet voraussetzt und der Of inefunktionalität getroffen werden.

In Abschnitt 5.1.2, der sich ebenfalls mit Reiseinformationen befasste, lag der Fokus auf spontanen Fahrgemeinschaften und damit auf einer Kooperation zwischen den beteiligten Akteuren. Die vorgestellte Anwendung adressiert primär dynamische Fahrgemeinschaften, bei denen keine langfristige Planung im Vorfeld möglich ist. Auch hier wurde eine lokale Ausführung favorisiert und ein verteilter Verhandlungsprozess umgesetzt. Dabei stellen der Austausch von Positionsdaten und deren Verarbeitung eine erhebliche Erleichterung zum tatsächlichen Auffinden potenzieller Kooperationspartner dar. Insbesondere der lokale Positionsaustausch fand bisher kaum Berücksichtigung, wobei die vorgestellte Anwendung sowohl die absolute als auch die relative Positionsverarbeitung unterstützt. Somit wird die Suche nach entsprechenden Angeboten oder Gesuchen für den Benutzer durch die Anwendung vereinfacht, da dieser nicht sämtliche in Frage kommenden Personen ansprechen muss, sofern dies auf Grund der Gegebenheiten oder zeitlicher Beschränkungen überhaupt möglich ist. Neben der Unterstützung bei der Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften im öffentlichen Verkehr, ist auch der Einsatz im privaten Personenverkehr möglich. Auch in diesem Fall ist die vorgeschlagene Positionsverarbeitung sinnvoll, da einerseits keine persönliche Kommunikation stattfinden kann und andererseits um gegebenenfalls die Positionen potenzieller Mitfahrer am Straßenrand ausfindig zu machen. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten auf diesem Gebiet wird keine zentrale Entität oder Infrastruktur benötigt, so dass die grundlegende Funktionalität auch in anderen Bereichen eingesetzt werden kann. Ein Beispiel ist die Verwendung in Verbindung mit dem bedarfsorientierten Transportsystemen aus Abschnitt 5.3, wodurch wartende Fahrgäste, deren Positionen eine relativ geringe Entfernung zueinander aufweisen, eine gemeinsame Abholposition vereinbaren können. Dadurch müssen die Fahrgäste nicht mehr an unterschiedlichen Positionen aufgenommen werden, sondern können effizienter an einer Position zusteigen. Allerdings wird auf diese Weise auch der Komfort eingeschränkt, da gegebenenfalls eine bestimmte Strecke zu Fuß zurückgelegt werden muss, die aber abhängig von der Kommunikationsreichweite entsprechend gering ist.

Insgesamt stellen die beschriebenen Anwendungen eine Ergänzung im Bereich der Reiseinformationen dar und fördern die Nutzung alternativer Mobilitätsangebote. Mit Hilfe dieser sogenannten Pull Maßnahmen kann eine entsprechende Verschiebung im Modal Split erreicht werden und zu einer Reduzierung des Individualverkehrs beitragen.

In Abschnitt 5.2, der sich mit einem Teilbereich des Verkehrsmanagements befasste, wurde ein System zur gemeinschaftlichen Parkraumverwaltung vorgestellt. Insbesondere in urbanen Regionen trägt der Parkplatzsuchverkehr zu einem erheblichen Anteil am Verkehrsaufkommen bei. Im Gegensatz zu bisherigen Systemen wurde bei dem vorgestellten Ansatz ein Parkvorgang automatisch, mit Hilfe moderner Smartphones, erkannt. In diesem Zusammenhang wurden die grundlegende Architektur der mobilen Anwendung und einige Möglichkeiten für Erkennungskomponenten sowie deren Umsetzung erläutert. Der Einsatz von

Smartphones hat dabei zusätzlich den Vorteil, dass diese Geräte einerseits weit verbreitet sind und andererseits unabhängig vom Fahrzeug genutzt werden können. Auf der Serverseite werden die gemeinschaftlich gemeldeten Parkvorgänge registriert und entweder aus dem System entfernt oder zunächst auf deren Gültigkeit überprüft, um regelwidrige Parkplätze auszuschließen. Die regelkonformen Parkplätze werden anschließend mit zusätzlichen Informationen versehen, die für die Filterung im Rahmen der Bereitstellung relevant sind. Anhand einer Nutzerstudie wurde der vorgestellte Ansatz unter realen Bedingungen getestet und die Auswirkungen auf Zeit für die Parkplatzsuche mit und ohne Verwendung des Systems untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass detaillierte Informationen über die aktuelle Verfügbarkeit von Parkplätzen zu kürzeren Suchzeiten führen.

Aus Sicht eines Benutzers zählt die Anwendung daher eigentlich zu den Reiseinformationen, wobei eine kürzere Suchzeit zu einer Verringerung des Parkplatzsuchverkehrs führt und damit für die Administration ein Instrument zur städtischen Verkehrsbeeinussung darstellt. Mit Hilfe dieses Systems können gewöhnliche Straßenparkplätze, ohne die Installation einer zusätzlichen Infrastruktur, berücksichtigt und interessierten Benutzern zur Verfügung gestellt werden.

Im Hinblick auf den bedarfsorientierten Transport, wurden in Abschnitt 5.3 zunächst unterschiedliche kooperative Verfahren vorgestellt, die auf dem Prinzip der dynamischen Transferknoten basieren. Dabei wurde als erstes das zentrale Verfahren, bei dem eine Entität in Form eines Servers sowohl für Koordination der Fahrzeuge bezüglich der Routenplanung als auch für die Planung der Kooperation zuständig ist, beschrieben. Das unterstützende Verfahren erlaubt die Verteilung der Arbeitslast zwischen den Fahrzeugen und der zentralen Entität, wobei letztere mit Hilfe der Zuweisung potenzieller Fahrgäste die Routenplanung der Fahrzeuge beeinussen kann. Zuletzt wurde das verteilte Verfahren vorgestellt, bei dem sämtliche Aufgaben von den Fahrzeugen, die am Transportsystem beteiligt sind, durchgeführt werden. Im Anschluss an die qualitative Bewertung der Verfahren wurde neben der entwickelten Simulationsumgebung und deren Funktionalität auch die Umsetzung der zuvor beschriebenen Verfahren erläutert. Im Anschluss an die initialen Experimente auf einem einfachen Straßengitter wurden quantitative Untersuchungen anhand unterschiedlicher Einsatzgebiete auf der Basis realer Straßennetze durchgeführt. Dadurch wurde einerseits die vielseitige Einsetzbarkeit des Prinzips der dynamischen Transferknoten demonstriert und andererseits wurden mit Hilfe der Simulationen die Auswirkungen unterschiedlicher Konfigurationen auf die wesentlichen Kennwerte untersucht. Im Vordergrund stand dabei der Personentransport in urbanen Regionen, der im Rahmen eines bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transportsystems realisiert wurde.

Hervorzuheben ist, dass ausschließlich dynamische Anfragen betrachtet wurden und somit keine Tourenplanung im Vorfeld möglich ist. Diese Tatsache erhöht die Komplexität der zugrundeliegenden Problemstellung und hat damit einen erheblichen Einfluss auf die Skalierbarkeit entsprechender Lösungsansätze, bei denen dynamische Anfragen bisher nur zu einem geringen Prozentsatz berücksichtigt wurden. Auf Grund dessen ist die praktische Einsetzbarkeit bedarfsorientierter Transportsysteme auf ländliche Regionen oder eine verhältnismäßig geringe Nachfrage beschränkt, wobei in der Regel eine Reservierung im Vorfeld erforderlich ist. Insbe-

sondere der Vergleich zu einem bestehenden öffentlichen Nahverkehrsnetz belegt die Skalierbarkeit des vorgestellten Verfahrens für große Instanzen, wobei zusätzlich rund 10% kürzere Gesamtzeiten erreicht werden konnten. Zudem können durch entsprechende Gewichtungen unterschiedliche Kriterien bei der Optimierung berücksichtigt werden und erlauben somit eine exible Anpassung für den jeweiligen Anwendungszweck. Die Verfahren auf Basis der dynamischen Transferknoten greifen somit die bisher kaum erforschten Möglichkeiten durch Fahrzeugwechsel, nach dem Vorbild des öffentlichen Nahverkehrs, in Verbindung mit bedarfsorientierten Transportsystemen auf und demonstrieren die praktische Umsetzbarkeit in städtischen Gebieten mit hoher Nachfrage.

Aus Sicht der Benutzer kann mit Hilfe der vorgestellten Verfahren ein skalierbares bedarfsorientiertes Tür-zu-Tür Transportsystem als weitere Mobilitätsalternative zur Verfügung gestellt werden, das sich basierend auf Simulationen als konkurrenzfähig zum vorhandenen Nahverkehrsnetz in London erwiesen hat. Aus Sicht der Mobilitätsanbieter ergeben sich auf Basis des Prinzips der dynamischen Transferknoten neue Möglichkeiten zur Schaffung entsprechender Angebote, die eine hohe Verfügbarkeit und Abdeckung erzielen und einen effizienten Personentransport gewährleisten.

Abschnitt 5.4.1 befasste sich mit der Überwachung der Schadstoffbelastung in städtischen Regionen. Bisherige Ansätze basieren in der Regel auf einzelnen fest installierten Messstationen oder Sensornetzwerken, deren Knoten sich an festgelegten Positionen befinden. Weitere Möglichkeiten verwenden zur Berechnung der aktuellen Schadstoffbelastung aufwendige Modelle, die zahlreiche zusätzliche Informationen voraussetzen. Das vorgestellte System basiert hauptsächlich auf mobilen Sensoren, deren Positionen sich permanent verändern und somit von einer starken räumlichen Verteilung auszugehen ist. Zur Verwaltung der georeferenzierten Informationen wurde ein modifiziertes Quadtree Verfahren eingesetzt, um dem Problem der stark schwankenden Messdichte zu begegnen. Basierend auf den vorliegenden Daten, können unterschiedliche Krigingvarianten verwendet werden, um in diesem Fall die Schadstoffbelastung an unbekannten Positionen zu interpolieren. Die hierfür verwendeten Verfahren sind dabei robust gegenüber Messfehlern und ermöglichen zudem eine effiziente Verarbeitung und Darstellung der Messwerte. Die unter Verwendung synthetischer Messwerte durchgeführten Untersuchungen bezogen sich dabei im Wesentlichen auf den Rechenaufwand zur Interpolation der beiden Krigingvarianten und bestätigten die Performanz des vorgestellten Systems. Mit Hilfe dieses Systems können somit einerseits reale Daten erfasst und berücksichtigt werden, und andererseits lassen sich diese durch Interpolation in einem hohen Detailgrad für weitere Dienste oder zur reinen Überwachung verwenden.

Für die Administration ergeben sich dabei zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten, die neben der einfachen Überprüfung von Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung über die Nutzung der Informationen als ergänzende Planungsgrundlage bis hin zur Etablierung eines umweltsensitiven Verkehrsmanagements reichen. Bezogen auf letzteren Punkt wurde in Abschnitt 5.4.2 auf Basis dieses Systems eine Anwendung zur Planung einer schadstoffarmen Route vorgestellt, die wiederum den anfangs behandelten Reiseinformationen zugeordnet werden kann. Für die Umsetzung wurde ein Expositionsmodell entwickelt, das bei der Routenberechnung verwendet wird, um einen Weg zu finden, auf dem der Benutzer einer möglichst geringen Schadstoffbe-

lastung ausgesetzt ist. Die beobachteten Ergebnisse der Simulationen lassen den Schluss zu, dass dieser Ansatz insbesondere für langsame Verkehrsteilnehmer, wie beispielsweise Fahrradfahrern, zu einer überproportionalen Reduzierung der Exposition im Vergleich zum zeitlichen Aufwand erreicht werden kann.

Insgesamt wurden in diesem Kapitel zu jedem der adressierten Bereiche eigene Ansätze vorgestellt, deren Umsetzung erläutert und die jeweiligen Ergebnisse diskutiert. Die entwickelten Anwendungen und Systeme richten sich dabei an die identifizierten Akteuren und bieten Möglichkeiten an, die ortsverändernde Mobilität durch geeignete Informationen zu unterstützen, die Umsetzung neuartiger bedarfsorientierter Systeme zu realisieren oder die resultierende Belastung für die Umwelt zu überwachen. Im nächsten Kapitel folgt eine abschließende Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit, bevor basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ein Ausblick auf die zukünftige Mobilität in Megastädten gegeben wird.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Punkte der Arbeit sowie die zentralen Ergebnisse zusammengefasst, bevor im Anschluss ein Ausblick für eine zukünftige und nachhaltige Mobilität in Megastädten gegeben wird.

6.1 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurden einleitend die wesentlichen Begriffe der Überschrift: Kooperation, Mobilität und Megastädte für den weiteren Verlauf definiert. Im Anschluss wurden die bestehenden Probleme in Verbindung mit der Mobilität dargestellt, wobei die wesentliche Herausforderung darin besteht, die Wettbewerbsfähigkeit, die Lebensqualität sowie die Auswirkungen auf die Umwelt in Einklang zu bringen. Die für die Mobilität relevanten Akteure und deren grundlegende Anforderungen wurden identifiziert, bevor ein Überblick über das Forschungsgebiet der intelligenten Transportsysteme gegeben wurde. Anhand der dort definierten Bereiche zu denen entsprechende Forschungsprojekte vorgestellt wurden, erfolgte die Fokussierung der Arbeit auf die Teilgebiete: Reiseinformationen, Verkehrsmanagement, bedarfsorientierter Transport und Umweltüberwachung.

Zu jedem der adressierten Bereiche wurden in Kapitel 3 relevante Forschungsarbeiten analysiert, wobei auch industrielle und bereits im praktischen Einsatz befindliche Systeme berücksichtigt wurden. Basierend auf der Gegenüberstellung mit geeigneten Parametern wurden der Forschungsbedarf sowie die bestehenden Probleme und Einschränkungen aufgezeigt, denen mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Anwendungen und Systemen begegnet wurde.

In Kapitel 4 wurden die zur Umsetzung der vorgestellten Lösungsansätze notwendigen Grundlagen erläutert. Als Basis für die Kooperation wurden zunächst geeignete Kommunikationstechnologien sowie deren Funktionsweise beschrieben, ehe Modelle zur verteilten Kommunikation bzw. Dienstnutzung vorgestellt und diskutiert wurden. Im darauf folgenden Abschnitt wurde die Verwaltung geografischer Informationen behandelt, die mit Hilfe von Geoinformationssystemen effizient umgesetzt werden kann. Im Hinblick auf die Verwendung von mobilen Endgeräten, die über begrenzte Ressourcen bezüglich Rechenleistung, Arbeitsspeicher und Speicherkapazität verfügen, wurde zusätzlich auf Verfahren zur hierarchischen Unterteilung von Räumen eingegangen. Auf diese Weise können große Datenmengen, die einen räumlichen Bezug aufweisen, unter anderem auf mobilen Endgeräten verwendet werden. Insbe-

sondere für Anwendungen und Systeme im Zusammenhang mit der räumlichen Mobilität ist die Planung sowie die Berechnung von Routen bzw. Touren essentiell. Diesbezüglich wurden gängige mathematische Verfahren vorgestellt, die auch die Grundlage für wesentlich komplexere kombinatorische Problemstellungen, wie den Transport von Personen oder Waren von und zu mehreren unterschiedlichen Bestimmungsorten, darstellen. Im weiteren Verlauf wurden die existierenden Klassen und Ansätze zur Lösung von Tourenplanungsproblemen erläutert, die sich allerdings nur bedingt zur Lösung von hoch dynamischen Problemstellungen eignen. Hierfür wurde ein kooperativer Ansatz für den bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transport auf der Basis des eingeführten Prinzips der dynamischen Transferknoten entwickelt und dessen Funktionsweise beschrieben. Im Hinblick auf die Umweltüberwachung wurden im letzten Abschnitt basierend auf den statistischen Grundlagen verschiedene Verfahren diskutiert, mit denen unter anderem georeferenzierte Messwerte in flächendeckende Messdaten überführt werden können.

Die für die einzelnen Bereiche entwickelten Anwendungen und Systeme sowie deren technische Umsetzungen wurden in Kapitel 5 erörtert. Abschnitt 5.1.1 befasste sich mit der Umsetzung einer mobilen Anwendung zur Routenplanung in öffentlichen Verkehrsnetzen, die eine kontextabhängige Aktualisierung der Route realisiert, sofern ein Benutzer von dieser abweicht oder aus anderen Gründen die geplanten Verbindungen nicht nutzen kann. Aus Sicht der Benutzer sorgt die lokale Routenberechnung im Hinblick auf die dadurch verfügbaren Reiseinformationen für mehr Transparenz und Flexibilität bei der Nutzung öffentlicher Verkehrsangebote. Die dadurch gesteigerte Attraktivität entsprechender Angebote kann zu einer Reduzierung des Individualverkehrs beitragen und somit eine verkehrsreduzierende Wirkung nach sich ziehen.

Ebenfalls im Rahmen des Bereichs der Reiseinformationen, wurde in Abschnitt 5.1.2 eine Anwendung zur Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften entwickelt. Unter Verwendung von Ad hoc Kommunikationstechnologien und durch den zusätzlichen Austausch sowie die Verarbeitung von Positionsdaten vereinfacht diese unter anderem das Auffinden der beteiligten Benutzer, um eine Kooperation zwischen diesen zu ermöglichen. Aus Sicht der Benutzer können mit Hilfe dieser Anwendung Kosten, auch bei kurzfristig geplanten Fahrten, eingespart werden, wobei die gesteigerte Auslastung der gemeinsam genutzten Fahrzeuge gleichzeitig zur Reduzierung des Verkehrsaufkommens beiträgt.

Im Bereich des Verkehrsmanagements, setzte sich das in Abschnitt 5.2.1 beschriebene System mit dem Parkplatzsuchverkehr auseinander. Der kollaborative Ansatz basiert auf der automatischen Erkennung von Parkvorgängen mittels moderner Smartphones bzw. der darin integrierten Sensorik. Die gemeinschaftlich erfassten Informationen werden von einer zentralen Entität auf deren Gültigkeit überprüft und bereitgestellt. Die Ergebnisse der durchgeführten Nutzerstudie demonstrieren neben der erfolgreichen praktischen Umsetzung auch den Nutzen durch die Zeitersparnis bei der Suche nach freien Parkplätzen. Eine Reduzierung der Suchzeit führt dabei auch zu einer Verringerung des Parkplatzsuchverkehrs und bietet dadurch sowohl für die Benutzer als auch für die Administration entsprechende Vorteile.

Im Hinblick auf den Bereich des öffentlichen Verkehrs, wurde in Abschnitt 5.3 das Prinzip der dynamischen Transferknoten in Form von drei unterschiedlichen Verfahren für den

bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transport umgesetzt und qualitativ bewertet. Die vorgestellten Systeme wurden anhand geeigneter Simulationen und für unterschiedliche Einsatzgebiete quantitativ untersucht. Der Schwerpunkt lag auf der Analyse bedarfsorientierter Tür-zu-Tür Personentransportsysteme in städtischen dicht besiedelten Gebieten, wobei ausschließlich von dynamischen Anfragen ausgegangen wurde. Die jeweiligen Ergebnisse verdeutlichen die Skalierbarkeit der vorgestellten Verfahren für große Probleminstanzen bezüglich der benötigten Fahrzeuge im Verhältnis zum Fahrgastaufkommen. Des Weiteren erlaubt der zugrundeliegende Ansatz eine flexible Gewichtung von und die Optimierung nach unterschiedlichen Parametern, die zur Reduzierung der Gesamtzeiten bzw. der Anzahl von benötigten Fahrzeugen führen. Im Vergleich zum existierenden öffentlichen Nahverkehrsnetz in London konnte mit Hilfe des verwendeten Verfahrens eine Verringerung der Gesamtzeiten für den Transport der Fahrgäste von 10% erreicht werden. Dies verdeutlicht zum einen das Potenzial der entwickelten Lösung und zum anderen die Verwendbarkeit von bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transportsystemen im städtischen Umfeld. Somit leisten die vorgestellten Verfahren einen wichtigen Beitrag zur Lösung hoch dynamischer Tourenplanungsprobleme mit Hilfe von Transfermöglichkeiten durch die Kooperation zwischen den beteiligten Transportfahrzeugen. Sowohl für Mobilitätsanbieter als auch für Benutzer ergeben sich dadurch neue Möglichkeiten zur Schaffung bzw. Nutzung von Mobilitätsangeboten in Form von bedarfsorientierten Tür-zu-Tür Transportsystemen, die somit eine Alternative zum Individualverkehr darstellen und zu dessen Reduzierung beitragen.

Im Zusammenhang mit den Auswirkungen der ortsverändernden Mobilität auf die Umwelt und dem entsprechenden Bereich intelligenter Transportsysteme wurde in Abschnitt 5.4.1 ein System zur Schadstoffüberwachung in städtischen Regionen entwickelt. Dieses ermöglicht die Verarbeitung und Visualisierung von georeferenzierten und räumlich stark verteilten Messwerten, die beispielsweise gemeinschaftlich mit Hilfe mobiler Endgeräte erfasst werden. Unter Verwendung synthetischer Messwerte wurde das System bezüglich der Laufzeit der Interpolationsverfahren für den Großraum München evaluiert. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Laufzeiten für einen hohen Detailgrad mit einem Punktabstand von ca. 45 Metern bei der Straßennetzinterpolation bzw. mit Gebieten einer Größe von unter 1,5 Winkelsekunden bei der Rasterinterpolation rund 15 Minuten auf einem handelsüblichen Computer betrugen. Für die Administration eignet sich das vorgestellte System somit zur Überwachung von umweltrelevanten Daten, da neben einem hohen und lückendeckenden Detailgrad eine zeitnahe Berücksichtigung von Veränderungen der Schadstoffbelastung gewährleistet wird. Darüber hinaus können diese Informationen für umweltsensitive Dienste und Anwendungen verwendet werden.

Eine solche Anwendung wurde abschließend in Abschnitt 5.4.2 vorgestellt, die auf der Basis von Umweltinformationen die Berechnung einer schadstoffarmen oder gesunden Route durchführt. Im Vergleich zu herkömmlichen Routingstrategien konnte durch den Einsatz der umweltsensitiven Routenberechnung, insbesondere für langsame Verkehrsteilnehmer in Form von Fahrradfahrern, eine erhebliche Verringerung der Schadstoffexposition erreicht werden, die im Durchschnitt bei fast 13% lag, wobei die zurückgelegte Distanz bzw. die benötigte Fahrzeit lediglich um rund 7% zunahm. Aus Sicht der Benutzer kann diese Anwendung dem Bereich der Reiseinformationen zugeordnet werden, die auf der Basis der aktuellen Luftqualität

neue Möglichkeiten für eine umwelt- und gesundheitsbewusste Fortbewegung in städtischen Gebieten eröffnet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Anwendungen und Systeme für die adressierten Bereiche neue Möglichkeiten aufzeigen, wie den Herausforderungen im Zusammenhang mit der Mobilität begegnet werden kann. Mit der Unterstützung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Kombination mit mobilen Endgeräten sowie auf der Basis des gemeinschaftlichen Zusammenwirkens, leisten diese damit einen Beitrag zur Förderung einer effizienten und nachhaltigen Mobilität in Megastädten.

6.2 Ausblick

Mobilität wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen und stellt damit einen essentiellen Bestandteil der modernen Gesellschaft dar. Eine individuelle und exible Fortbewegung sowie der effiziente Transport von Waren tragen dabei wesentlich zur Steigerung der Lebensqualität und zum wirtschaftlichen Wachstum bei. Allerdings hat die ortsverändernde Mobilität erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt, die sich neben dem Platzbedarf für die notwendige Infrastruktur auch in den damit verbundenen Belastungen durch Lärm und Abgase manifestieren. Insbesondere in Megastädten, deren Anzahl weiterhin zunehmen wird, konzentrieren sich auf Grund der steigenden Einwohnerzahlen die aus dem extremen Verkehrsaufkommen resultierenden Probleme. Diese können aber nicht durch eine einzelne Technologie oder mit einer Anwendung oder einem System gelöst werden, sondern vielmehr führen zahlreiche Innovationen sowie neue Konzepte und Anwendungen für die jeweiligen Bereiche intelligenter Transportsysteme zu einer stetigen Verbesserung des Status Quo.

Im Hinblick auf die jüngsten Entwicklungen können die Auswirkungen auf die Umwelt in Form von Lärm und Abgasen mit Hilfe der propagierten Elektromobilität reduziert werden. Flexible Car-Sharing Angebote ermöglichen eine individuelle Mobilität ohne ein eigenes Fahrzeug und mobile Endgeräte oder Smartphones sorgen für eine ortsunabhängige Verfügbarkeit von Information rund um die Mobilität. Eine entscheidende Rolle für zukünftige Mobilität spielt die Kombination und das Zusammenspiel unterschiedlicher Systeme, weshalb vor allem kooperativen Ansätzen ein großes Potenzial eingeräumt wird, um den bestehenden Herausforderungen zu begegnen. Diesbezüglich ermöglichen insbesondere die Entwicklungen auf dem Gebiet der mobilen Kommunikation eine kooperative Vernetzung der Verkehrsteilnehmer und gewährleisten somit das Zusammenwirken der beteiligten Akteure auf unterschiedlichen Ebenen, wie die vorgestellten Anwendungen und Systeme verdeutlichen. Ein gemeinschaftliches Zusammenwirken, sowohl beim Transport als auch bei weiteren damit in Verbindung stehenden Aspekten, wie der angesprochenen Parkplatzsuche, ermöglicht eine effizientere Nutzung der vorhandenen bzw verfügbaren Ressourcen.

Weitere Verbesserungen werden sich künftig durch die Fortschritte bei selbstfahrenden Fahrzeugen ergeben, die jederzeit und kostengünstig zur Verfügung stehen und daher zur Umsetzung bedarfsorientierter Tür-zu-Tür Transportsysteme verwendet werden können. Zudem kann durch eine Kooperation zwischen dem vorgestellten Transportsystem und dem schienenengebundenen Nahverkehr, bei der zusätzlich geeignete Haltestellen unter

Berücksichtigung der jeweiligen Abfahrtszeiten bedient werden, eine weitere Verkürzung der Fahrzeiten bei längeren Strecken erreicht werden. Hinsichtlich einer nachhaltigen Mobilität wird neben einer umweltbewussteren Fortbewegung auch eine umweltsensitive Verkehrsbeeinussung immer mehr an Bedeutung gewinnen, wobei auf der Basis des vorgestellten Systems eine schadstoffbasierte Lichtsignalanlagensteuerung umgesetzt werden kann. Obwohl mit den technischen Innovationen und den daraus entstehenden Möglichkeiten große Fortschritte erreichbar sind, bedarf es darüber hinaus entsprechender Anreize für die Annahme und Nutzung von entsprechenden Mobilitätsangeboten durch die Bevölkerung, weshalb zudem ein Umdenken stattfinden muss, um in Zukunft eine effiziente und nachhaltige Mobilität in Megastädten zu realisieren.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Herausforderungen und Abhängigkeiten nachhaltiger Mobilität	12
2.2	Akteure und Abhängigkeiten bezüglich Mobilität und Herausforderungen	17
4.1	Beispielhafte Ausprägung eines BSP Baumes	58
4.2	Beispielhafte Ausprägung eines Quadrees	59
4.3	Modellierung eines Straßennetzes (links) als Graph (rechts)	61
4.4	Überblick von Lösungsansätzen zur Tourenplanung	65
4.5	Gegenüberstellung statischer und dynamischer Transferknoten	71
4.6	Fahrgastzuordnung vor und nach dem Clustering nach Breiten und Längengrad .	75
4.7	h-Streudiagramm und daraus bestimmtes Semivariogramm	80
4.8	Sphärisches Semivariogramm nach automatisiertem Fitting	82
5.1	Systemarchitektur des mobilen Routenplaners	93
5.2	Beispiel zusätzlicher Transferkanten zwischen öffentlichem Verkehrs- und Straßennetz	94
5.3	Zusammengesetzter Pol, Straßen und ÖPNV Graph	95
5.4	Hierarchische Unterteilung des Münchner Straßennetzes für die Routenberech- nung vom Start- zum Zielpunkt	96
5.5	Berechnung der dynamischen Komponente bei der Routenplanung	97
5.6	Beispielmessung zur Haltestellenerkennung	98
5.7	Ablauf zur Bildung dynamischer Fahrgemeinschaften	101
5.8	Systemarchitektur zur Unterstützung spontaner Fahrgemeinschaften	101
5.9	Varianten der Positionsbestimmung	103
5.10	Adresskonfiguration und Paketweiterleitung	104
5.11	Vereinfachter Algorithmus zum Routenabgleich	107
5.12	Schema zur Erkennung von Parkvorgängen	112
5.13	Typische Parkmuster	114
5.14	Fiktive Multiplikatoren für die Gültigkeitsdauer nach Stadtteil	119
5.15	Fiktive Multiplikatoren für die Gültigkeitsdauer nach Tageszeit	119
5.16	Testgebiet, P 2	122
5.17	Parkplatzbelegung in der Münchner Innenstadt und statistischer Nutzen des gemeinschaftlichen Parkplatzmanagements	123
5.18	Systemüberblick des zentralen Verfahrens	126
5.19	Systemüberblick des unterstützenden Verfahrens	127
5.20	Ablauf einer verteilten DTN Verhandlung	128
5.21	Systemüberblick des verteilten Verfahrens	129

5.22 Verfahren und Mechanismen im Vergleich zu Kontrolle/Optimierungsgrad und Skalierbarkeit	132
5.23 Algorithmus des zentralen Verfahrens für den bedarfsorientierten Transport . . .	138
5.24 Algorithmen des unterstützenden Verfahrens für den bedarfsorientierten Transport	139
5.25 Algorithmen des verteilten Verfahrens für den bedarfsorientierten Transport . . .	140
5.26 Warte-, Fahr- und Gesamtzeit, statische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung	143
5.27 Fahrzeugwechsel und Distanzen, statische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung	144
5.28 Warte-, Fahr- und Gesamtzeit, dynamische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung	145
5.29 Fahrzeugwechsel und Fahrzeugnutzung, dynamische Flotte, mit (DTN) und ohne (NoDTN) Optimierung	146
5.30 Straßennetz und Städte von Tansania	150
5.31 Vergleich zwischen DTN und direktem Warentransport in Tansania	151
5.32 Szenarien für den verteilten Ansatz mit DTNs	153
5.33 Verwendete Straßennetze	154
5.34 Anzahl der Fahrzeugwechsel für Barcelona und München	157
5.35 Fahrzeugeinsatz pro Fahrgast für Barcelona und München	158
5.36 Relative Veränderung der Zeiten für Barcelona und München	159
5.37 Verlauf der absoluten Wartezeiten für Barcelona und München	160
5.38 Vergleich eines Fahrzeugwechsels für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen	164
5.39 Verhältnis der Busse pro Fahrgast für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen	165
5.40 Vergleich der Distanz pro Bus für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen	166
5.41 Abgelehnte Transportaufträge für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen .	167
5.42 Vergleich der Fahrzeiten für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen	167
5.43 Vergleich der Wartezeiten für unterschiedliche Gewichtungskonfigurationen . . .	168
5.44 Eigene Darstellung der Busrouten in London aus den OSM Daten	171
5.45 Bildschirmfoto einer Simulation	172
5.46 Verhältnis der Fahrzeugwechsel und eingesetzte Fahrzeuge pro Fahrgast sowie Anteil der abgelehnten Transportaufträge	173
5.47 Warte-, Fahr- und Gesamtzeit von DTN und TFL	174
5.48 Systemüberblick der kollaborativen Schadstoffüberwachung	178
5.49 Grundlegende Architektur zur kollaborativen Schadstoffüberwachung	179
5.50 Abbildung eines Quadtrees mit Quantilverfahren	182
5.51 Abbildung der Rasterdaten auf Straßensegmente	186
5.52 Funktion des Ortes $E_s(l)$	186
5.53 Farbkodierung basierend auf der Funktion des Ortes	186
5.54 Darstellung eines farbkodierten Straßennetzes als Overlay über einer OSM Karte	187

5.55 Darstellung der Schadstoffkonzentration als monochromes und farbkodiertes Bitmap	188
5.56 Darstellung der Schadstoffkonzentration als 3D Point Cloud, monochrom und farbkodiert	188
5.57 Verteilungsfunktionen von q für 15 und 75 Meter Abstand	190
5.58 Vergleich von d und der berechneten durchschnittlichen Segmentlänge	191
5.59 Skalierbarkeit der Punkt- und Rasterinterpolation	192
5.60 Erweiterte Systemarchitektur für die schadstoffbasierte Routenplanung	192
5.61 Funktion des Ortes mit konstanter Geschwindigkeit	193
5.62 Start- bzw. Zielpunkte zur Untersuchung der schadstoffbasierten Routenplanung	196
5.63 Vergleich der Parameter mit und ohne Berücksichtigung der Umweltdaten	197
5.64 Berechnete Routen mit und ohne Berücksichtigung der Schadstoffinformationen	198

Tabellenverzeichnis

2.1	Ausprägungen von Anforderungen der wesentlichen Akteure	20
2.2	Methoden und Anwendungen von ITS	22
2.3	Bereiche und Dienste für ITS Nutzer nach [7]	23
3.1	Mobile Anwendungen für den öffentlichen Verkehr	32
3.2	Anwendungen zur Unterstützung dynamischer Fahrgemeinschaften	35
3.3	Systeme und Anwendungen zur (kollaborativen) Parkplatzverwaltung	37
3.4	Systeme und Anwendungen für den bedarfsorientierten Transport	41
3.5	Systeme zur (kollaborativen) Umweltüberwachung	45
4.1	Vergleich gängiger Kommunikationstechnologien	53
4.2	Merkmale für Routenplanungsprobleme	64
4.3	Ansätze zur Lösung dynamischer Tourenplanungsprobleme	69
4.4	Verbreitete isotrope Semivariogrammodelle	81
5.1	Schnittstellenbeschreibung der Komponenten	113
5.2	Parkplatzart und relative Winkeländerung	115
5.3	Beispiele für Parkregeln in OpenStreetMap	118
5.4	Simulationsergebnisse für die Städte Barcelona und München ohne (NoDTN) und mit (DTN) Optimierung	156
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse unterschiedlicher Gewichtungskonfigurationen	169
5.6	Vergleich der wesentlichen Kennwerte	174
5.7	Minimum, Maximum, Mittelwert μ und Standardabweichung σ von q	190
5.8	Statistische Kenngrößen von d_q , t_q und e_q	197

Literaturverzeichnis

- [1] *Digitaler Betriebs-/Bündelfunk(DBB) im ÖPNV: Anforderungen an eine offene standardisierte ortsfeste und mobile Netzwerkstruktur.* Verband Dt. Verkehrsunternehmen (VDV), 2003 (VDV-Schriften)
- [2] AGARWAL, Pankaj K. ; MURALI, T. M. ; VITTER, Jeffrey S.: Practical techniques for constructing binary space partitions for orthogonal rectangles. In: *Proceedings of the thirteenth annual symposium on Computational geometry.* New York, NY, USA : ACM, 1997 (SCG 97). – ISBN 0–89791–878–9, S. 382–384
- [3] AGUIAR, Ana ; NUNES, Francisco ; SILVA, Manuel ; ELIAS, Dirk: Personal Navigator for a Public Transport System using RFID Ticketing. In: *In Motion 2009*, 2009
- [4] ALLPORT, R J.: Transport management: private demands and public needs. In: *Megacity Management in the Asian and Pacific Region*, 1996, S. 177–226
- [5] AMMOSER, Hendrik ; HOPPE, Mirko: *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften.* 2006
- [6] ARNOLD, D. ; ARNOLD, D. ; ISERMANN, H. ; KUHN, A. ; TEMPELMEIER, H. ; FURMANS, K.: *Handbuch Logistik.* Springer, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 9783540729280
- [7] ASSOCIATION, W.R.: *PIARC ITS Handbook: Second Edition.* World Road Association, 2005. – ISBN 9782840601746
- [8] ATTANASIO, Andrea ; CORDEAU, Jean-François ; GHIANI, Gianpaolo ; LAPORTE, Gilbert: Parallel Tabu search heuristics for the dynamic multi-vehicle dial-a-ride problem. In: *Parallel Comput.* 30 (2004), März, Nr. 3, S. 377–387. – ISSN 0167–8191
- [9] BANERJEE, Nilanjan ; AGARWAL, Sharad ; BAHL, Paramvir ; CHANDRA, Ranveer ; WOLMAN, Alec ; CORNER, Mark: Virtual Compass: Relative Positioning to Sense Mobile Social Interactions. In: *Pervasive Computing* Bd. 6030. Springer Berlin / Heidelberg, 2010, S. 1–21
- [10] BANKHOFER, Udo ; WILHELM, Michael ; WILLINER, Gabriela: *Modelle und Methoden der Tourenplanung.* November 2006. – ISSN 1861-9223 ISBN 3-938940-06-9
- [11] BEASLEY, J. E.: Route first Cluster second methods for vehicle routing. In: *Omega-international Journal of Management Science* 11 (1983), S. 403–408
- [12] BEAUDRY, Alexandre ; LAPORTE, Gilbert ; MELO, Teresa ; NICKEL, Stefan: Dynamic transportation of patients in hospitals. In: *OR Spectrum* 32 (2010), S. 77–107. – ISSN 0171–6468
- [13] BEHRISCH, M. ; BIEKER, L. ; ERDMANN, J. ; KRAJZEWICZ, D.: SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview. In: *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation.* Barcelona, Spain, October 2011, S. 63–68
- [14] BEKTAŞ, Tolga ; ERDOĞAN, Güneş ; RØPKE, Stefan: Formulations and Branch-and-Cut Algorithms for the Generalized Vehicle Routing Problem. In: *Transportation Science* 45 (2011), August, Nr. 3, S. 299–316. – ISSN 1526–5447
- [15] BELLMAN, Richard: On a Routing Problem. In: *Quarterly of Applied Mathematics* 16 (1958), S. 87–90
- [16] BERBEGLIA, G. ; CORDEAU, J.-F. ; GRIBKOVSKAIA, I. ; LAPORTE, G.: Static Pickup and Delivery Problems: A Classification Scheme and Survey. (2007), April
- [17] BERBEGLIA, Gerardo ; JEAN-FRANÇOIS, Cordeau ; LAPORTE, Gilbert: Dynamic pickup and delivery problems. In: *European Journal of Operational Research* 202 (2010), Nr. 1, S. 8–15
- [18] BERS, Josh ; GOSAIN, Abhimanyu ; ROSE, Ian ; WELSH, Matt: CitySense: The Design and Performance of an Urban Wireless Sensor Network Testbed. (2010)
- [19] BERTOLOTTO, M. ; O HARE, G. ; STRAHAN, R. ; BROPHY, A. ; MARTIN, A. ; MCLOUGHLIN, E.: *Bus Catcher: a Context Sensitive Prototype System for Public Transportation Users.* 2002
- [20] BIAGIONI, James ; AGRESTA, Adrian ; GERLICH, Tomas ; ERIKSSON, Jakob: TransitGenie: A Context-aware, Real-time Transit Navigator. In: *SenSys 09: Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems.* New York, NY, USA : ACM, 2009. – ISBN 978–1–60558–519–2, S. 329–330
- [21] BONG, D.B.L. ; TING, K.C. ; RAJAEI, N.: Integrated Approach in the Design of Car-Park Occupancy Information System. In: *International Journal of Computer Science* 35 (2008), S. 7–14
- [22] BORNDÖRFER, Ralf ; GRÖTSCHEL, Martin ; KLOSTERMEIER, Fridolin ; KÜTTNER, Christian: *Telebus Berlin:*

- Vehicle Scheduling in a Dial-a-Ride System. In: WILSON, Nigel H. M. (Hrsg.): *Computer-aided transit scheduling. Proceedings, Cambridge, MA, USA, August 1997*, Springer, 1999
- [23] BRAMEL, Julien ; SIMCHI-LEVI, David: A Location Based Heuristic for General Routing Problems. In: *Operations Research* 43 (1993), S. 649–660
- [24] BREEDAM, A. V.: *An analysis of the behavior of heuristics for the vehicle routing problem for a selection of problems with vehicle-related, customer-related, and time-related constraints*, University of Antwerp, Belgium, Diss., 1994
- [25] BRIGGS, David J. ; DE HOOGH, Cornelis ; GULLIVER, John ; WILLS, John ; ELLIOTT, Paul ; KINGHAM, Simon ; SMALLBONE, Kirsty: A regression-based method for mapping traffic-related air pollution: application and testing in four contrasting urban environments. In: *Science of The Total Environment* 253 (2000), Nr. 1-3, S. 151–167. – ISSN 0048–9697
- [26] BRIGGS, D.J ; COLLINS, S. ; ELLIOTT, P. ; FISCHER, P. ; KINGHAM, S. ; LEBRET, E. ; PRYL, K. ; REEUWIJK, H. van ; SMALLBONE, K. ; VEEN, A. van d.: Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach. In: *International Journal of Geographical Information Science* 11 (1997), Nr. 7, S. 699–718
- [27] BROWNLOW, M.: *Goldene Regeln der Spieleprogrammierung: Methoden zur effizienten Programmierung von Computerspielen*. Hanser, 2004. – ISBN 9783446229280
- [28] BÜCHER GRUPPE: *Datenbankindex: B-Baum, Hashtabelle, Indexstruktur, R-Baum, B+-Baum, B*-Baum, Grid le, Bitmapindex, Ub-Baum*. General Books LLC, 2010. – ISBN 9781158791293
- [29] BUDIMAN MINASNY ; ALEX. B. MCBRATNEY: The Matérn function as a general model for soil variograms. In: *Geoderma* 128 (2005), Nr. 3-4, S. 192–207. – ISSN 0016–7061
- [30] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Mobilität 21 - Beispiele für innovative Verkehrslösungen*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010
- [31] BUNDESUMWELTAMT: *Luftqualität 2011 - Feinstaubepisoden prägten das Bild*. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-1/4211.pdf>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [32] CAMPBELL, Andrew T. ; EISENMAN, Shane B. ; LANE, Nicholas D. ; MILUZZO, Emiliano ; PETERSON, Ronald A.: People-centric urban sensing. In: *In The Second Annual International Wireless Internet Conference (WICON)*, IEEE Computer Society Press, 2006, S. 2–5
- [33] CHANG, Shwu-Jing ; HSU, Gong-Ying ; HUANG, Shian-Jia: Location-aware mobile transportation information service. In: *IEE Conference Publications* 2005 (2005), Nr. CP496, S. 102–102
- [34] CHATZIMISIOS, P. ; BOUCOUVALAS, A. C. ; VITSAS, V.: IEEE 802.11 Packet Delay - A Finite Retry Limit Analysis. In: *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2003, S. 950–954
- [35] CHEN, Bo ; CHENG, Harry H.: A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. In: *Trans. Intell. Transport. Sys.* 11 (2010), Nr. 2, S. 485–497. – ISSN 1524–9050
- [36] CHEVERST, Keith ; DAVIES, Nigel ; MITCHELL, Keith ; FRIDAY, Adrian ; EFSTRATIOU, Christos: Developing a context-aware electronic tourist guide: some issues and experiences. In: *CHI 00: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA : ACM, 2000. – ISBN 1–58113–216–6, S. 17–24
- [37] CHRISTOFIDES, N ; EILON, S: Algorithms for Large-Scale Traveling Salesman Problems. In: *Operations Research Quarterly* (1972), Nr. 23, S. 511–518
- [38] CLARKE, G. ; WRIGHT, J. W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. In: *Operations Research* 12 (1964), Nr. 4, S. 568–581
- [39] COAST, S.: *OpenStreetMap - The Free Wiki World Map*. 2004. – Letzter Aufruf 20.12.2012
- [40] CORDEAU, Jean-François ; DELL'AMICO, Mauro ; IORI, Manuel: Branch-and-cut for the pickup and delivery traveling salesman problem with FIFO loading. In: *Comput. Oper. Res.* 37 (2010), Mai, Nr. 5, S. 970–980. – ISSN 0305–0548
- [41] CORMEN, T. H. ; STEIN, C. ; RIVEST, R. L. ; LEISERSON, C. E.: *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill Higher Education, 2001. – ISBN 0070131511
- [42] CORTÉS, Cristián E. ; MATAMALA, Martín ; CONTARDO, Claudio: The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method. In: *European Journal of Operational Research* 200 (2010), Nr. 3, S. 711–724
- [43] COSLOVICH, Luca ; PESENTI, Raffaele ; UKOVICH, Walter: A two-phase insertion technique of unexpected customers for a dynamic dial-a-ride problem. In: *European Journal of Operational Research* 175 (2006), December, Nr. 3, S. 1605–1615
- [44] CRESSIE, Noel: Fitting Variogram Models by Weighted Least Squares. In: *Mathematical Geology* 17 (1985), Nr. 5, S. 563–586
- [45] CRESSIE, Noel A. C.: *Statistics for Spatial Data*. Rev. New York and NY : Wiley, 1993 (Wiley series in probability and mathematical statistics). – ISBN 9780471002550
- [46] CROES, G. A.: A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. In: *Operations Research* 6 (1958), Nr. 6,

- S. 791–812
- [47] ČURCIN, V. ; GHANEM, M. ; GUO, Y. ; KÖHLER, M. ; ROWE, A. ; SYED, J. ; WENDEL, P.: Discovery net: towards a grid of knowledge discovery. In: *Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. New York, NY, USA : ACM, 2002 (KDD 02). – ISBN 1–58113–567–X, S. 658–663
 - [48] DANNHEIM, Clemens ; ICKING, Christian ; MAEDER, Markus: Geobasiertes IPv6 Routing in LTE zur dynamischen Adressierung von Verkehrsteilnehmern. In: *9. Berliner Fachtagung Wireless Communication and Information*, 2012
 - [49] DANTZIG, George B.: On the Shortest Route Through a Network. In: *Management Science* 6 (1960), Nr. 2, S. 187–190
 - [50] DE JONG, Kenneth A.: *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ann Arbor, MI, USA, Diss., 1975. – AAI7609381
 - [51] DEMIRBAS, M. ; RUDRA, C. ; RUDRA, A. ; BAYIR, M.A.: iMAP: Indirect measurement of air pollution with cellphones. In: *Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on*, 2009, S. 1–6
 - [52] DEMMEL, Sébastien ; LAMBERT, Alain ; GRUYER, Dominique ; RAKOTONIRAINY, Andry ; MONACELLI, Eric: Empirical IEEE 802.11p performance evaluation on test tracks. In: *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2012. – ISBN 978–1–4673–2119–8, S. 837–842
 - [53] DENIG, Stefan: *Megacity Challenges - A stakeholder perspective*. 2007
 - [54] DIGGLE, P. J. ; RIBEIRO, Paulo J.: *Model-based Geostatistics (Springer Series in Statistics)*. 1. Springer, 2007 (Springer series in statistics). – ISBN 0387329072
 - [55] DIJKSTRA, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik* 1 (1959), Nr. 1, S. 269–271. – ISSN 0029–599X
 - [56] DING, Bolin ; YU, Jeffrey X. ; QIN, Lu: Finding time-dependent shortest paths over large graphs. In: *Proceedings of the 11th international conference on Extending database technology: Advances in database technology*. New York, NY, USA : ACM, 2008 (EDBT 08). – ISBN 978–1–59593–926–5, S. 205–216
 - [57] DOMINIC GREENWOOD, Klaus D. Christian Dannegger D. Christian Dannegger: *Dynamic Dispatching and Transport Optimization a Real-World Experience with Perspectives on Pervasive Technology Integration*. 2008
 - [58] DOPPLER, Klaus ; RINNE, Mika ; J, Pekka ; RIBEIRO, Cassio ; HUGL, Klaus: Device-to-Device communications; functional prospects for LTE-Advanced networks. In: *ICC 2009*, 2009
 - [59] DUCHON, Markus: A Context-Aware Mobile Traveller Information System Based on OpenStreetMap. In: *GI/KuVS Fachgespräch Ortbezogene Anwendungen und Dienste* Bd. 7. Berlin, Germany, 2010
 - [60] DUCHON, Markus ; DÜRR, Michael ; WIESNER, Kevin: Kollaboratives Parkplatzmanagement: Ein Community basierter Ansatz. In: *GI/KuVS Fachgespräch Ortbezogene Anwendungen und Dienste* Bd. 8. Munich, Germany, 2011
 - [61] DUCHON, Markus ; LINNHOFF-POPIEN, Claudia: Platform for Logistic and Transport Utilizing Dynamic Transshipment Points. In: *International Journal of Engineering and Technology* 4 (2012), Nr. 2, S. 148–152
 - [62] DUCHON, Markus ; PAULUS, Andreas ; WERNER, Martin: *Mobile Anwendung zur Routenplanung mit öffentlichen Verkehrsmitteln basierend auf OpenStreetMap-Daten*. Heidelberg, Germany : 6. Konferenz über Freie und Open Source Software für Geoinformationssysteme, Heidelberg, Germany, 2011
 - [63] DUCHON, Markus ; SCHINDHELM, Corina ; DÜRR, Michael ; GSCHWANDTNER, Florian ; KÖPKE, Julian: Pervasive Ad hoc Location Sharing To Enhance Dynamic Group Tours. In: *1st International Conference on Advances in Information Mining and Management*. Barcelona, Spain, 2011
 - [64] DUCHON, Markus ; SCHINDHELM, Corina ; LASOWSKI, Robert: Distributed Cooperative On-Demand Transportation. In: *73rd IEEE Vehicular Technology Conference (Spring)*. Budapest, Hungary, 2011
 - [65] DUCHON, Markus ; SCHINDHELM, Corina ; NIEDERMEIER, Christoph: Cyber Physical Multimedia Systems: A Pervasive Virtual Audio Community. In: *3rd International Conferences on Advances in Multimedia*. Budapest, Hungary, 2011
 - [66] DUCHON, Markus ; SOMMER, David ; DÜRR, Michael: Evaluation of Dynamic Transfer Nodes for Distributed Cooperative On-Demand Transportation. In: *74th IEEE Vehicular Technology Conference (Fall)*. San Francisco, USA, 2011
 - [67] DUCHON, Markus ; WIESNER, Kevin ; MÜLLER, Alexander ; LINNHOFF-POPIEN, Claudia: Collaborative Sensing Platform for Eco Routing and Environmental Monitoring. In: *3rd International Conference on Sensor Systems and Software*. Lissabon, Portugal, 2012
 - [68] DÜRR, Michael ; DUCHON, Markus ; WIESNER, Kevin ; SEDLMEIER, Andreas: Distributed Group and Rights Management for Mobile Ad Hoc Networks. In: *4th Wireless and Mobile Networking Conference*. Toulouse, France, 2011

- [69] DÜRR, Michael ; GSCHWANDTNER, Florian ; SCHINDHELM, Corina K. ; DUCHON, Markus: Secure and Privacy-Preserving Cross-Layer Advertising of Location-Based Social Network Services. In: *5th International Conference on Mobile Computing, Applications and Services*. Los Angeles, USA, 2011
- [70] EHLERS, M.: *Höhen üge in der Geoinformatik: Lernmodule für Wirtschaft und Verwaltung*. CeBIT 2006., 2006
- [71] EISENMAN, Shane B. ; MILUZZO, Emiliano ; LANE, Nicholas D. ; PETERSON, Ronald A. ; AHN, Gahng-Seop ; CAMPBELL, Andrew T.: BikeNet: A mobile sensing system for cyclist experience mapping. In: *ACM Trans. Sen. Netw* 6 (2010), S. 6:1–6:39. – ISSN 1550–4859
- [72] ELBERT, B.R. ; MARTYNA, B.: *Client/server computing: architecture, applications, and distributed systems management*. Artech House, 1994 (Artech House telecommunications library). – ISBN 9780890066911
- [73] EMERY, Xavier: Iterative algorithms for fitting a linear model of coregionalization. In: *Computers & Geosciences* (2010), April. – ISSN 00983004
- [74] EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Richtlinie 2010 40 EU Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern*. <http://eur-lex.europa.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [75] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: *Cooperative Intelligent Transport Systems*. <http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/CooperativeITS.aspx>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [76] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: Terrestrial Trunked Radio (TETRA) / European Telecommunications Standards Institute - ETSI. 2007. – Forschungsbericht
- [77] FERRIS, B. ; WATKINS, K. ; BORNING, A.: Location-Aware Tools for Improving Public Transit Usability. In: *IEEE Pervasive Computing* 9 (2009), S. 13–19. – ISSN 1536–1268
- [78] FINKEL, R. A. ; BENTLEY, J. L.: Quad trees a data structure for retrieval on composite keys. In: *Acta Informatica* 4 (1974), Nr. 1, S. 1–9. – ISSN 0001–5903
- [79] FISHER, Marshall L. ; JAIKUMAR, Ramchandran: A generalized assignment heuristic for vehicle routing. In: *Networks* 11 (1981), Nr. 2, S. 109–124. – ISSN 1097–0037
- [80] FLOOD, M.M.: The travelling-salesman problem. In: *Operations Research* 6 (1956), S. 61–75
- [81] FORD, L. R.: *Network Flow Theory / The RAND Corporation*, Santa Monica, California. 1956 (P-923). – Paper
- [82] FORSCHUNGSINITIATIVE AKTIV: *Cooperative Cars (eXtended)*. <http://www.aktiv-online.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [83] FOSTER, B. A. ; RYAN, D. M.: An Integer Programming Approach to the Vehicle Scheduling Problem. (1976)
- [84] FRAUNHOFER FOKUS: *OpenRide*. <http://www.open-ride.com/english/index.php>. Version: 2011
- [85] FU, Ying ; FANG, Yu ; JIANG, Changjun ; CHENG, JiuJun: Dynamic Ride Sharing Community Service on Traffic Information Grid. In: *ICICTA 08: Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2008. – ISBN 978-0-7695-3357-5, S. 348–352
- [86] FUCHS, Henry ; KEDEM, Zvi M. ; NAYLOR, Bruce F.: On visible surface generation by a priori tree structures. In: *Computer Graphics*, 1980, S. 124–133
- [87] GATHER, M. ; KAGERMEIER, A. ; LANZENDORF, M.: *Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung*. Borntraeger, 2008 (Studienbücher der Geographie). – ISBN 9783443071431
- [88] GERTH, E.: *Zwischenbetriebliche Kooperation*. Poeschel, 1971 (Sammlung Poeschel). – ISBN 9783791090696
- [89] GHANEM, M. ; GUO, Y. ; HASSARD, J. ; OSMOND, M. ; RICHARDS, M.: Sensor Grids for Air Pollution Monitoring. In: *In Proc. 3rd UK e-Science All Hands Meeting*, 2004
- [90] GHELOWAT, Sunil ; RADKE, Kenneth ; BRERETON, Margot: Interaction, privacy and profiling considerations in local mobile social software: a prototype agile ride share system. In: *Proceedings of the 22nd Conference of the Computer-Human Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (OZCHI 10). – ISBN 978-1-4503-0502-0, S. 376–379
- [91] GIBBONS, Phillip B. ; KARP, Brad ; KE, Yan ; NATH, Suman ; SESHAN, Srinivasan: IrisNet: An Architecture for a Worldwide Sensor Web. In: *IEEE Pervasive Computing* 2 (2003), S. 22–33. – ISSN 1536–1268
- [92] GILLET, Billy E. ; MILLER, Leland R.: A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. In: *Operations Research* 22 (1974), Nr. 2, S. 340–349
- [93] GLOVER, Fred: Tabu Search Part I. In: *ORSA Journal on Computing* 1 (1989), Nr. 3, S. 190–206
- [94] GLOVER, Fred: Tabu Search Part II. In: *ORSA Journal on Computing* 2 (1990), Nr. 1, S. 4–32
- [95] GOLDBERG, David E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. – ISBN 0201157675
- [96] GRAMLICH, Nicolas: *osmdroid: OpenStreetMap-Tools for Android*. <http://code.google.com/p/osmdroid/>, 2010
- [97] HART, Peter E. ; NILSSON, Nils J. ; RAPHAEL, Bertram: A Formal Basis for the Heuristic Determination of

- Minimum Cost Paths. In: *IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics* 4 (1968), Nr. 2, S. 100–107
- [98] HASBERG, Peter: *Mobilität in Ballungsräumen - Erste Umsetzungsergebnisse der Leitprojekte*. 2002
- [99] HE, Ruichun ; LI, Yinzhen ; FENG, Xuesong: Models and Genetic Algorithms for the Optimal Stochastic Riding Routes in Urban Public Transportation and Its Applications. In: *ICNC 07: Proceedings of the Third International Conference on Natural Computation*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2007. – ISBN 0-7695-2875-9, S. 431–435
- [100] HEGERING, H.G. ; ABECK, S. ; NEUMAIR, B.: *Integriertes Management vernetzter Systeme: Konzepte, Architekturen und deren betrieblicher Einsatz*. dpunkt-Verlag, 1999 (The Morgan Kaufmann Series in Networking). – ISBN 9783932588167
- [101] HEINZLE, Frauke ; ANDERS, Karl-Heinrich ; SESTER, Monika: Pattern Recognition in Road Networks on the Example of Circular Road Detection. In: *Geographic, Information Science* Bd. 4197. Springer Berlin Heidelberg, 2006. – ISBN 978-3-540-44526-5, Kapitel 11, S. 153–167
- [102] HELLERSTEIN, Joseph M. ; NAUGHTON, Jeffrey F. ; PFEFFER, Avi: Generalized Search Trees for Database Systems. In: *Proceedings of the 21th International Conference on Very Large Data Bases*. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995 (VLDB 95). – ISBN 1-55860-379-4, 562–573
- [103] HENGL, Tomislav: A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. In: *JRC Scientific and Technical Reports* (2007)
- [104] HIEMSTRA, P.H. ; PEBESMA, E.J. ; TWENHÖFEL, C.J.W. ; HEUVELINK, G.: Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. In: *Computers & Geosciences* 35 (2009), Nr. 8, S. 1711–1721. – ISSN 0098-3004
- [105] HINE, J. ; EBDEN, J. ; SWAN, P.: *A comparison of freight transport operations in Tanzania and Indonesia*. 1997
- [106] HINTERDING, A. ; MÜLLER, A. ; GERLACH, N. ; GABEL, F.: Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug / Institut für Geoinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. 2003. – Forschungsbericht
- [107] HOHN, M.: *Geostatistics and Petroleum Geology*. New York : Van Nostrand, 1988
- [108] HÖHNBERG, Gunther: *Empirie-basiertes Entwurfsverfahren für die Parkraumbewirtschaftung in innenstadtnahen Mischgebieten*, Technische Universität München, Diss., 2002
- [109] HOLLAND, John H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1992. – ISBN 0262082136
- [110] HORN, Mark E.: Fleet scheduling and dispatching for demand-responsive passenger services. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 10 (2002), Nr. 1, S. 35 – 63. – ISSN 0968-090X
- [111] HOU, Gang ; ZHOU, Kuanjiu ; TIAN, Yang: Algorithm for Public Transit Trip with Minimal Transfer Times and Shortest Travel Time. In: *KSEM*, 2007, S. 562–567
- [112] HSIN-CHUNG ; LU: The statistical characters of PM10 concentration in Taiwan area. In: *Atmospheric Environment* 36 (2002), Nr. 3, S. 491–502. – ISSN 1352-2310
- [113] HUANG, Ruihong: A Schedule-based Pathfinding Algorithm for Transit Networks Using Pattern First Search. In: *Geoinformatica* 11 (2007), Nr. 2, S. 269–285. – ISSN 1384-6175
- [114] HULL, Bret ; BYCHKOVSKY, Vladimir ; ZHANG, Yang ; CHEN, Kevin ; GORACZKO, Michel ; MIU, Allen ; SHIH, Eugene ; BALAKRISHNAN, Hari ; MADDEN, Samuel: CarTel: a distributed mobile sensor computing system. In: *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*. New York and NY and USA : ACM, 2006 (SenSys 06). – ISBN 1-59593-343-3, S. 125–138
- [115] HUTH, T.: *Integrationsstrategien für Routing- und Allokationsmodelle in dynamischen und stochastischen Logistiknetzwerken*. Südwestdeutscher Verlag, 2009. – ISBN 9783838107943
- [116] IDRIS, M.Y.I. ; LENG, Y.Y. ; TAMIL, E.M. ; NOOR, N.M. ; RAZAK, Z.: Car Park System: A Review of Smart Parking System and its Technology. In: *Information Technology Journal* 8 (2009), S. 101–113
- [117] IEEE COMPUTER SOCIETY: *Wireless LAN Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2012
- [118] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *CO₂ Emissions from Fuel Combustion - Highlights*. 2011. – letzter Aufruf 30.08.2012
- [119] IQBAL, Zafar: *A Standard Mobile Phone as a Chemical Sensor*, Linköping University, Diss., 2011. – 26 S.
- [120] IVU UMWELT GMBH: *Modulares GIS-integriertes Programmsystem zum Einsatz in der Luftreinhaltung*. 2012
- [121] JARIYASUNANT, Jerald ; WORK, Daniel ; KERKEZ, Branko ; SENGUPTA, Raja ; GLASER, Steven ; BAYEN, Alexandre: Mobile Transit Trip Planning with Real-Time Data. In: *Transportation Research Board Annual Meeting* (2010)
- [122] JERRETT, Michael ; ARAIN, Altaf ; KANAROGLU, Pavlos ; BECKERMAN, Bernardo ; POTOGLU, Dimitri ; SAHSUVAROGLU, Talar ; MORRISON, Jason ; GIOVIS, Chris: A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. In: *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 15 (2004), Nr. 2, S.

185–204

- [123] KAN, H.D ; CHEN, B.H: Statistical distributions of ambient air pollutants in Shanghai, China. In: *Biomedical and Environmental Sciences* 17 (2004), Nr. 3, S. 366–372
- [124] KARNOUSKOS, Stamatis: Mobile payment: A journey through existing procedures and standardization initiatives. In: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 6 (2004), Nr. 1-4, S. 44–66
- [125] KARP, Richard M.: Reducibility Among Combinatorial Problems. In: MILLER, R. E. (Hrsg.) ; THATCHER, J. W. (Hrsg.): *Complexity of Computer Computations*. Plenum Press, 1972, S. 85–103
- [126] KINDERVATER, G.A.P. ; SAVELSBERGH, M.W.P.: Vehicle routing: Handling edge exchanges. In: *Local Search in Combinatorial Optimization* (1997), S. 337–360
- [127] KIRKPATRICK, S. ; GELATT, C. D. ; VECCHI, M. P.: Optimization by Simulated Annealing. In: *Science* 220 (1983), Nr. 4598, S. 671–680
- [128] KJELDSKOV, J. ; ANDERSEN, E. ; HEDEGAARD, L.: Designing and evaluating Buster: an indexical mobile travel planner for public transportation. In: *OZCHI 07: Proceedings of the 19th Australasian conference on Computer-Human Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2007. – ISBN 978-1-59593-872-5, S. 25–28
- [129] KJELDSKOV, J. ; HOWARD, S. ; MURPHY, J. ; CARROLL, J. ; VETERE, F. ; GRAHAM, C.: Designing TramMateña, a context-aware mobile system supporting use of public transportation. In: *DUX 03: Proceedings of the 2003 conference on Designing for user experiences*. New York, NY, USA : ACM, 2003. – ISBN 1-58113-728-1, S. 1–4
- [130] KLAUS, P. ; KRIEGER, W.: *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*;[A- Z]. Gabler, 2008. – ISBN 9783834901491
- [131] KNAPPSTEIN, Gerhard: *Kinematik und Kinetik: Arbeitsbuch mit ausführlichen Aufgabenlösungen, Grundbegriffen, Formeln, Fragen, Antworten*. 2. Frankfurt am Main : Deutsch, 2004. – ISBN 3817117388
- [132] KOMMISSION, Europäische: Status und Rahmenbedingungen für Intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland / Europäische Kommission. 2011. – Forschungsbericht
- [133] KOTZÉ, Paula: Defining and specifying graphs using formal model-based techniques. In: *South African Computer Journal* 26 (2000), S. 217–221
- [134] KOZIEROK, Charles M.: *APIPA - Automatic Private IP Addressing*. 2003
- [135] KREMO, Haris ; SESKAR, Ivan ; SPASOJEVIC, Predrag: The 802.11b Distributed Coordination Function: An ORBIT Testbed Study,. In: *IEEE TridentComm*, 2006
- [136] KRIGE, Daniel G.: A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. In: *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa* 52 (1951), Nr. 6, S. 119–139
- [137] KRIGE, D.G: *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand*, University of the Witwatersrand, South Africa, Masters thesis, 1951
- [138] KRYPCZYK, Veikko: *Nachbarschaftssuchverfahren für dynamische Pickup- und Delivery-Probleme*, FernUniversität in Hagen, Diss., 2010
- [139] LAPORTE, Gilbert: The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. In: *European Journal of Operational Research* 59 (1992), June, Nr. 3, S. 345–358
- [140] LARRONDO, Paula F. ; NEUFELD, Chad T. ; ; DEUTSCH, Clayton V.: *VARFIT: A Program for Semi-Automatic Variogram Modelling*. 2003
- [141] LASOWSKI, Robert ; SCHEUERMANN, Constantin ; GSCHWANDTNER, Florian ; DUCHON, Markus: A Multi Channel Synchronization Approach in Vehicular Ad-Hoc Networks. In: *73rd IEEE Vehicular Technology Conference (Spring)*. Budapest, Hungary, 2011
- [142] LESCUYER, P. ; LUCIDARME, T.: *Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. Wiley, 2008. – ISBN 9780470723661
- [143] LESTER, J ; HURVITZ, P ; CHAUDHRI, R ; HARTUNG, C ; BORRIELLO, G: *MobileSense-Sensing modes of transportation in studies of the built environment. UrbanSense08*. 2008
- [144] LI, Jinyang ; BLAKE, Charles ; COUTO, Douglas S. J. D. ; LEE, Hu I. ; MORRIS, Robert: Capacity of Ad Hoc Wireless Networks. In: *7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2001
- [145] LIN, C. ; YANG, Z. ; GONG, B.: Multimodal Traffic Information Service System with K-Multimodal Shortest Path Algorithm. In: *Intelligent Computation Technology and Automation, International Conference on* 3 (2009), S. 652–655. ISBN 978-0-7695-3804-4
- [146] LIN, S.: Computer solutions of the traveling salesman problem. In: *Bell System Technical Journal* 44 (1965), Nr. 10, S. 2245–2269
- [147] LIN, Shen ; KERNIGHAN, Brian W.: An Effective Heuristic Algorithm for the Travelling-Salesman Problem. In: *Operations Research* 21 (1973), S. 498–516
- [148] LINDER, Stefan: *China plant 42-Millionen-Mega-City*. Februar 2011. – letzter Aufruf 31.10.2012
- [149] LIU, Zhiqiang ; ISHIDA, Toru ; SHENG, Huanye: Multiagent-Based Demand Bus Simulation for Shanghai. In:

- ISHIDA, Toru (Hrsg.) ; GASSER, Les (Hrsg.) ; NAKASHIMA, Hideyuki (Hrsg.): *Massively Multi-Agent Systems I* Bd. 3446. Springer Berlin / Heidelberg, 2005. – ISBN 978-3-540-26974-8, S. 574–574
- [150] LOO, A.W.S.: *Peer-to-Peer Computing: Building Supercomputers with Web Technologies*. Springer London, Limited, 2007 (Computer Communications and Networks). – ISBN 9781846287473
- [151] LUND, K. ; MADSEN, O.B.G. ; RYGAARD, J.M. ; MATHEMATICAL MODELLING, Technical U. o. (Hrsg.): *Vehicle Routing Problems with Varying Degrees of Dynamism*. Technical University of Denmark, 1996 (Technical report IMM-REP)
- [152] M. SOL, M. W. P. S.: *A Branch-and-price Algorithm for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows*. Department of Mathematics and Computing Science, University of Technology, 1994 (Memorandum COSOR)
- [153] MADSEN, Oli ; RAVN, Hans ; RYGAARD, Jens: A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives. In: *Annals of Operations Research* 60 (1995), S. 193–208. – ISSN 0254-5330. – 10.1007/BF02031946
- [154] MARTINEZ, Maria V. ; SIMARI, Gerardo I. ; CASTILLO, Carlos D. ; PEER, Nir J.: *A GPS-Based On-Demand Shuttle Bus System*. 2006
- [155] MATHERON, G. ; BLONDEL, F.: *Traité de géostatistique appliquée*. Editions Technip, 1963
- [156] MELACHRINOUDIS, Emanuel ; ILHAN, Ahmet B. ; MIN, Hokey: A dial-a-ride problem for client transportation in a health-care organization. In: *Computers & OR* 34 (2007), Nr. 3, S. 742–759
- [157] MES, Martijn ; DER, Matthieu H. ; VAN, Aart H.: *Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems*. Enschede, 2005 (Beta working papers)
- [158] METROPOLIS, Nicholas ; ROSENBLUTH, Arianna W. ; ROSENBLUTH, Marshall N. ; TELLER, Augusta H. ; TELLER, Edward: Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. In: *The Journal of Chemical Physics* 21 (1953), Nr. 6, S. 1087–1092. – ISSN 00219606
- [159] MICHLER, Oliver: *Akteure des Verkehrsmanagements*. 2004
- [160] MITROVIĆ-MINIĆ, Snezana ; KRISHNAMURTI, Ramesh ; LAPORTE, Gilbert: Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 38 (2004), Nr. 8, S. 669 – 685. – ISSN 0191-2615
- [161] MITROVIĆ-MINIĆ, Snezana ; LAPORTE, Gilbert: Waiting strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 38 (2004), Nr. 7, S. 635 – 655. – ISSN 0191-2615
- [162] MITROVIĆ-MINIĆ, Snezana ; LAPORTE, Gilbert: The pickup and delivery problem with time windows and transshipment. In: *Information Systems and Operational Research* 44 (2006), S. 217–227
- [163] MOHAN, Siddharth ; KAPOOR, Rohit ; MOHANTY, Bibhu: *Latency in HSPA Data Networks*. 2012. – Letzter Aufruf 20.12.2012
- [164] MOLE, R. H. ; JAMESON, S. R.: A Sequential Route-building Algorithm Employing a Generalised Savings Criterion. In: *Operational Research Quarterly* 27 (1976), Nr. 2, S. 503–511. – ISSN 00303623
- [165] MOLINA, Luisa T. ; MOLINA, M.J.: *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*. Kluwer Academic Publishers, 2002 (Alliance for Global Sustainability Bookseries). – ISBN 9781402004520
- [166] MOON, H.G. ; SHIM, Y. ; KIM, D.H. ; JEONG, H.Y. ; JEONG, M. ; JUNG, J.Y. ; HAN, S.M. ; KIM, J.K. ; KIM, J. ; PARK, H. ; LEE, J. ; TULLER, H.L. ; YOON, S. ; JANG, H.W.: Self-activated ultrahigh chemosensitivity of oxide thin film nanostructures for transparent sensors. In: *Sci Rep* 2 (2012)
- [167] MORAIS CORDEIRO, Carlos de ; AGRAWAL, Dharma: Mobile Ad hoc Networking. In: *Center for Distributed and Mobile Computing, ECECS, University of Cincinnati* (2002)
- [168] MOREL, B. ; YEH, S. ; CIFUENTES, L.: Statistical distributions for air pollution applied to the study of the particulate problem in Santiago. In: *Atmospheric Environment* 33 (1999), Nr. 16, S. 2575–2586. – ISSN 1352-2310
- [169] MORREALE, Patricia ; QI, Feng ; CROFT, Paul: A green wireless sensor network for environmental monitoring and risk identification. In: *Int. J. Sen. Netw.* 10 (2011), Juni, Nr. 1/2, S. 73–82. – ISSN 1748-1279
- [170] MURTY, Rohan ; MAINLAND, Geoffrey ; ROSE, Ian ; CHOWDHURY, Atanu R. ; GOSAIN, Abhimanyu ; BERS, Josh ; WELSH, Matt: CitySense: An Urban-Scale Wireless Sensor Network and Testbed. In: *HST 08: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*. Waltham, MA, USA, May 2008
- [171] NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY: Department of Defense World Geodetic System 1984: its definition and relationships with local geodetic systems / National Imagery and Mapping Agency. 3rd. St. Louis, MO, USA : National Imagery and Mapping Agency, 2000 (TR8350.2). – Forschungsbericht
- [172] NEUMANN, K. ; MORLOCK, M.: *Operations Research*. Hanser, 2002. – ISBN 9783446221406
- [173] NICHOLSON, T. A. J.: Finding the Shortest Route between Two Points in a Network. In: *The Computer Journal* 9 (1966), Nr. 3, S. 275–280
- [174] NODA, Itsuki ; OHTA, Masayuki ; SHINODA, Kosuke ; KUMADA, Yoichiro ; NAKASHIMA, Hideyuki: Evaluation of

- Usability of Dial-a-Ride Systems by Social Simulation. In: HALES, David (Hrsg.) ; EDMONDS, Bruce (Hrsg.) ; NORLING, Emma (Hrsg.) ; ROUCHIER, Juliette (Hrsg.): *Multi-Agent-Based Simulation III* Bd. 2927. Springer Berlin / Heidelberg, 2003. – ISBN 978-3-540-20736-8, S. 167–181
- [175] ONLINE QUELLE: *3rd Generation Partnership Project*. <http://www.3gpp.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [176] ONLINE QUELLE: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [177] ONLINE QUELLE: *Aimsun - Traffic Simulation Software*. <http://www.aimsun.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [178] ONLINE QUELLE: *Air Quality in Europe*. <http://www.citeair.eu/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [179] ONLINE QUELLE: *ArcGIS*. <http://www.esri.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [180] ONLINE QUELLE: *Association of Public-Safety Communications Officials*. <http://apcointl.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [181] ONLINE QUELLE: *Autodesk AutoCAD® Map 3D*. <http://www.autodesk.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [182] ONLINE QUELLE: *Avego - Real-time Ridesharing for Commuters*. <http://www.avego.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [183] ONLINE QUELLE: *Bahnbilliger.de! Ländertickets teilen und dabei Geld sparen*. <http://www.bahnbilliger.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [184] ONLINE QUELLE: *Bing Maps*. <http://www.bing.com/maps/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [185] ONLINE QUELLE: *BMW ParkInfo*. <http://www.bmw.de/de/de/owners/connecteddrive/2010/parkinfo/parkinfo.html>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [186] ONLINE QUELLE: *Bundesumweltamt - Bundesrepublik Deutschland*. <http://www.umweltbundesamt.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [187] ONLINE QUELLE: *cab4me - The Mobile Call Finder*. <http://www.cab4me.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [188] ONLINE QUELLE: *Call a Bike*. <http://www.callabike-interaktiv.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [189] ONLINE QUELLE: *CAR 2 CAR Communication Consortium*. <http://www.car-to-car.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [190] ONLINE QUELLE: *The Case for Evolved Edge*. http://www.4gamericas.org/userfiles/File/2008_3G_Americas_The_Case_for_Evolved_Edge_Aug08.pdf. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [191] ONLINE QUELLE: *China plant 42-Millionen-Stadt*. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/groesste-metropole-der-welt-china-plant-42-millionen-stadt-a-741994.html>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [192] ONLINE QUELLE: *CITEAIR II - Common Information to European Air*. <http://www.citeair.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [193] ONLINE QUELLE: *CityMobil - Towards advanced road transport for the urban environment*. <http://www.citymobil-project.eu/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [194] ONLINE QUELLE: *CIVITAS - Cleaner And Better Transport In Cities*. <http://www.civitas.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [195] ONLINE QUELLE: *CVIS - Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*. <http://www.cvisproject.org>. <http://www.cvisproject.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [196] ONLINE QUELLE: *Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems - CVIS*. <http://www.cvisproject.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [197] ONLINE QUELLE: *COOPERS - CO-OPERative SystEms for Intelligent Road Safety*. <http://www.coopers-ip.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [198] ONLINE QUELLE: *Diagnostic trade integration study - Tanzania*. <http://web.worldbank.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [199] ONLINE QUELLE: *Digital Mobile Radio Association*. <http://dmrassociation.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [200] ONLINE QUELLE: *DRIVE C2X - Accelerate cooperative mobility*. <http://www.drive-c2x.eu/project>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [201] ONLINE QUELLE: *Driven to Excess: What under-priced curbside parking costs the Upper West Side*. <http://www.transalt.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [202] ONLINE QUELLE: *DriveNow Carsharing - Einfach: Auto menden-fahren-fertig*. <http://www.drive-now.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [203] ONLINE QUELLE: *eCall: Time saved = lives saved*. <http://ec.europa.eu/ecall>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [204] ONLINE QUELLE: *ecoDriver Supporting the driver in conserving energy and reducing emissions*. <http://www.ecodriver-project.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [205] ONLINE QUELLE: *eCoMove - Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency*. <http://www.ecomove-project.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013

- [206] ONLINE QUELLE: *ERTICO - Intelligent Transport Systems and Services for Europe*. <http://www.ertico.com/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [207] ONLINE QUELLE: *Fahrerlose Autos erreichten Ziel in Shanghai*. <http://www.altstadtkriterium.at/magazin/reise/2535861/fahrerlose-autos-erreichten-ziel-shanghai.story>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [208] ONLINE QUELLE: *Flinkster - Mein Carsharing*. <http://www.flinkster.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [209] ONLINE QUELLE: *FREILOT - Urban Freight Energy Efficiency Pilot*. <http://www.freilot.eu/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [210] ONLINE QUELLE: *GOOD ROUTE - Dangerous Goods Transportation Routing, Monitoring and Enforcement*. <http://bscw.safespot-eu.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [211] ONLINE QUELLE: *Google Maps*. <http://maps.google.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [212] ONLINE QUELLE: *GRASS GIS*. <http://grass.osgeo.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [213] ONLINE QUELLE: *HeERO - Harmonised eCall European Pilot*. <http://www.heero-pilot.eu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [214] ONLINE QUELLE: *HSPA to LTE-Advanced*. http://www.rysayvy.com/Articles/2009_09_3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced.pdf. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [215] ONLINE QUELLE: *Instant Mobility - Multimodality for people and goods in urban areas*. <http://www.instant-mobility.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [216] ONLINE QUELLE: *Java in Simulation Time - Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator, JiST/SWANS*. <http://jist.ece.cornell.edu>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [217] ONLINE QUELLE: *Journey Planner API - Transport for London*. <http://www.tfl.gov.uk>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [218] ONLINE QUELLE: *Kriterien für Parkplatzsuchverhalten*. http://www.krone.at/Nachrichten/Kriterien_fuer_Parkplatz-Suchverhalten-OeAMTC-Umfrage-Story-154843/index.html. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [219] ONLINE QUELLE: *Mapinfo®*. <http://www.pbinsight.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [220] ONLINE QUELLE: *MapServer - Open Source Web Mapping*. <http://mapserver.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [221] ONLINE QUELLE: *MicroStation*. <http://www.bentley.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [222] ONLINE QUELLE: *Mitfahrgelegenheiten in ganz Europa*. <http://www.mitfahrzentrale.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [223] ONLINE QUELLE: *Mobile Broadband Explosion*. http://www.rysayvy.com/Articles/2012_09_Mobile_Broadband_Explosion.pdf. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [224] ONLINE QUELLE: *Mu by Peugeot - so geht mieten heute*. <http://www.mu.peugeot.de>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [225] ONLINE QUELLE: *MVG Live - Ihre aktuellen Abfahrtszeiten*. <http://www.mvg-live.de/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [226] ONLINE QUELLE: *MySQL - The world's most popular open source database*. <http://www.mysql.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [227] ONLINE QUELLE: *myTaxi - Taxi fahren so wie ich es will*. <http://www.mytaxi.net>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [228] ONLINE QUELLE: *The Network Simulator - NS2*. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [229] ONLINE QUELLE: *NICHES - New and Innovative Concepts for Helping European transport Sustainability*. <http://www.niches-transport.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [230] ONLINE QUELLE: *Octopus Card*. <http://www.octopus.com.hk/home/en/index.html>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [231] ONLINE QUELLE: *OKI Develops World's First DSRC Inter-vehicle Communication Attachment for Mobile Phones to Help Pedestrian Safety*. <http://www.oki.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [232] ONLINE QUELLE: *Open Geospatial Consortium*. <http://www.opengeospatial.org>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [233] ONLINE QUELLE: *OpenLayers: Free Maps for the Web*. <http://openlayers.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [234] ONLINE QUELLE: *OpenSpot*. <https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!forum/openspot-discuss>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [235] ONLINE QUELLE: *Oracle Spatial*. <http://www.oracle.com>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [236] ONLINE QUELLE: *OSMOSIS - Processing OSM data*. <http://wiki.openstreetmap.org/index.php/Osmosis>. <http://wiki.openstreetmap.org/index.php/Osmosis>. – letzter Aufruf 31.01.2013
- [237] ONLINE QUELLE: *Pendlernetz - Gemeinsam fahren und sparen*. <http://www.pendlernetz.de>. – letzter

- Aufruf 31.01.2013
- [238] ONLINE QUELLE: *pgRouting Project - Open Source Routing Library*. <http://pgrouting.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [239] ONLINE QUELLE: *PostGIS*. <http://postgis.refractory.net/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [240] ONLINE QUELLE: *PostgreSQL*. <http://www.postgresql.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [241] ONLINE QUELLE: *PTV Vissim*. <http://www.ptv-vision.com/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [242] ONLINE QUELLE: *Quantum GIS*. <http://www.qgis.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [243] ONLINE QUELLE: *SAFESPOT - Smart Vehicles on Smart Roads*. <http://www.safespot-eu.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [244] ONLINE QUELLE: *SFPark - San Francisco Municipal Transportation Agency*. <http://sfpark.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [245] ONLINE QUELLE: *Sichere und Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland (simTD)*. <http://www.simtd.de/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [246] ONLINE QUELLE: *Sprit sparen und Mobil sein*. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3705.pdf>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [247] ONLINE QUELLE: *Stadtverwaltung München*. <http://www.muenchen.de/>. – letzter Aufruf 31.10.2012
 - [248] ONLINE QUELLE: *State of Nevada - Department of Motor Vehicles*. <http://www.dmvnv.com/autonomous.htm>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [249] ONLINE QUELLE: *Taxi.eu*. <http://www.taxi.eu/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [250] ONLINE QUELLE: *Tetrapol Forum*. <http://www.tetrapol.com/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [251] ONLINE QUELLE: *Toll Collect - Service on the road*. <http://www.toll-collect.de/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [252] ONLINE QUELLE: *Transport for London - Journey Planner*. <http://journeyplanner.tfl.gov.uk/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [253] ONLINE QUELLE: *Transport for London - Oyster Online*. <https://oyster.tfl.gov.uk/oyster/entry.do>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [254] ONLINE QUELLE: *Travolution*. <http://www.travolution-ingolstadt.de/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [255] ONLINE QUELLE: *Ultra pod systems*. <http://www.ultraglobalprt.com/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [256] ONLINE QUELLE: *Viajeo - Transport Planning and Travel Information*. <http://www.viajeo.eu/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [257] ONLINE QUELLE: *Volkswagen AG*. <http://dx.doi.org/http://www.volkswagen.de/de.html>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [258] ONLINE QUELLE: *WATCH-OVER*. <http://www.watchover-eu.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [259] ONLINE QUELLE: *World Business Council for Sustainable Development - Changing Pace Mobility*. <http://www.wbcsd.org/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [260] ONLINE QUELLE: *ZebraMobil - Ein Auto, wenn man s braucht*. <https://www.zebramobil.de/>. – letzter Aufruf 31.01.2013
 - [261] OTT, W.R.: A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations. In: *Journal of the Air & Waste Management Association* 40 (1990), Nr. 10, S. 1378
 - [262] OTTMANN, T. ; WIDMAYER, P.: *Algorithmen und Datenstrukturen*. Spektrum, Akad. Verlag, 2002 (Spektrum Lehrbuch). – ISBN 9783827410290
 - [263] OTTO, Thomas: *Kooperative Verkehrsbeeinussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten*. Kassel University Press, 2011 (Schriftenreihe Verkehr). – ISBN 9783862191901
 - [264] PANKRATZ, Giselher: Dynamic vehicle routing by means of a genetic algorithm. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 35 (2005), Mai, Nr. 5, S. 362–383. – ISSN 0960–0035
 - [265] PARDO-IGÚZQUIZA, Eulogio: VARFIT: a fortran-77 program for fitting variogram models by weighted least squares. In: *Computers & Geosciences* 25 (1999), S. 251–261
 - [266] PARRAGH, S.N. ; DOERNER, K.F. ; HARTL, R.F.: A survey on pickup and delivery problems. Part I: Transportation between customers and depot. In: *Journal für Betriebswirtschaft* (2008), April, S. 21–51
 - [267] PARRAGH, S.N. ; DOERNER, K.F. ; HARTL, R.F.: A survey on pickup and delivery problems. Part II: Transportation between pickup and delivery locations. In: *Journal für Betriebswirtschaft* (2008), Juni, S. 81–117
 - [268] PARRAGH, Sophie: *Ambulance Routing Problems with Rich Constraints and Multiple Objectives*, University of Vienna, Diss., 2009
 - [269] PIORKOWSKI, Michal: Collaborative Transportation Systems. In: *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, 2010

- [270] PIORKOWSKI, Michal ; RAYA, Maxim ; LUGO, Ada L. ; PAPADIMITRATOS, Panos ; GROSSGLAUSER, Matthias ; HUBAUX, Jean-Pierre: *TrANs: Realistic Joint Traffic and Network Simulator for VANETs*. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* (2007)
- [271] PLUMMER, David C.: *An Ethernet Address Resolution Protocol RFC 826*. November 1982
- [272] POULTON, C. ; TYLER, G. ; DORWARD, A. ; KYDD, J. ; STOCKBRIDGE, M.: *Commercial Agriculture in Africa: Lessons from Success and Failure*. Centre for Environmental Policy, Imperial College, February 2008
- [273] POUSTTCHI, K.: *Mobile Payment in Deutschland: Szenarienübergreifendes Referenzmodell Für Mobile Bezahlvorgänge*. Deutscher Universitäts Verlag, 2005 (Gabler Edition Wissenschaft). – ISBN 9783824482726
- [274] PRINZ, Vivian ; EIGNER, Robert ; WOERNDL, Wolfgang: Cars communicating over publish/subscribe in a peer-to-peer vehicular network. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*. New York, NY, USA : ACM, 2009 (IWCMC 09). – ISBN 978-1-60558-569-7, S. 431–436
- [275] REDDY, Sasank ; MUN, Min ; BURKE, Jeff ; ESTRIN, Deborah ; HANSEN, Mark ; SRIVASTAVA, Mani: Using mobile phones to determine transportation modes. In: *ACM Trans. Sen. Netw.* 6 (2010), March, S. 13:1–13:27. – ISSN 1550-4859
- [276] REKIEK, Brahim ; DELCHAMBRE, Alain ; SALEH, Hussain A.: Handicapped Person Transportation: An application of the Grouping Genetic Algorithm. In: *Eng. Appl. of AI* (2006), S. 511–520
- [277] REPENNING, Alexander: Mobility Agents: Guiding and Tracking Public Transportation Users,“ presented at. In: *Proceedings of AVI 2006 Advanced Visual Interfaces International Working Conference*, ACM Press, 2006, S. 127–134
- [278] ROPKE, Stefan ; CORDEAU, Jean-François: Branch and Cut and Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. In: *Transportation Science* 43 (2009), August, Nr. 3, S. 267–286. – ISSN 1526-5447
- [279] ROPKE, Stefan ; CORDEAU, Jean-François ; LAPORTE, Gilbert: Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. In: *Netw.* 49 (2007), Juli, Nr. 4, S. 258–272. – ISSN 0028-3045
- [280] ROTH, J.: *Mobile Computing: Grundlagen, Technik, Konzepte*. Dpunkt-Verlag, 2005 (Dpunkt Lehrbuch). – ISBN 9783898643665
- [281] RÖTHLEIN, Brigitte: *Boomende Meag-Städte fressen das Land auf*. 2007
- [282] RUDNICKI, Radoslaw ; ANDERS, Karl heinrich ; SESTER, Monika: *RENDEZVOUS-PROBLEM IN LOCAL SHARED-RIDE TRIP PLANNING*. 2008
- [283] RYAN, Patrick H. ; LEMASTERS, Grace K.: A review of land-use regression models for characterizing intraurban air pollution exposure. In: *Inhalation toxicology* 19 Suppl 1 (2007), S. 127–133. – ISSN 1091-7691
- [284] SAMET, H.: *The design and analysis of spatial data structures*. Addison-Wesley, 1990 (Addison-Wesley series in computer science). – ISBN 9780201502558
- [285] SANDERS, Peter ; SCHULTES, Dominik ; VETTER, Christian: Mobile Route Planning. In: HALPERIN, Dan (Hrsg.) ; MEHLHORN, Kurt (Hrsg.): *Algorithms - ESA 2008* Bd. 5193. Springer Berlin, Heidelberg, 2008, S. 732–743
- [286] SCHILLER, J.: *Mobilkommunikation*. Pearson Studium, 2003 (Pearson Studium). – ISBN 9783827370600
- [287] SCHMITTING, W.: *Das Traveling-Salesman-Problem: Anwendungen und heuristische Nutzung von Voronoi-Delaunay-Strukturen zur Lösung euklidischer, zweidimensionaler Traveling-Salesman-Probleme*. W. Schmitting, 2000 (Bd. 1). – ISBN 9783000040894
- [288] SCHULTES, Dominik: *Route Planning in Road Networks*, Diss., 2008
- [289] SCOTT, J. ; MARSHALL, G.: *A dictionary of sociology*. Oxford University Press, 2005 (Oxford Paperback Reference). – ISBN 9780198609872
- [290] SHAO, Jianhua ; GREENHALGH, Chris: DC2S: a dynamic car sharing system. In: *Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Location Based Social Networks*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (LBSN 10). – ISBN 978-1-4503-0434-4, S. 51–59
- [291] SHEN, X. ; YU, H. ; BUFORD, J. ; AKON, M.: *Handbook of Peer-to-Peer Networking*. Springer, 2009 (Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies). – ISBN 9780387097503
- [292] SHEPARD, Donald: A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*. New York and NY and USA : ACM, 1968 (ACM 68), S. 517–524
- [293] SHINODA, Kousuke ; NODA, Itsuki ; OHTA, Masayuki ; KUMADA, Yoichiro ; NAKASHIMA, Hideyuki: Is Dial-a-Ride Bus Reasonable in Large Scale Towns? Evaluation of Usability of Dial-a-Ride Systems by Simulation. In: KURUMATANI, Koichi (Hrsg.) ; CHEN, Shu-Heng (Hrsg.) ; OHUCHI, Azuma (Hrsg.): *Multiagent for Mass User Support* Bd. 3012. Springer Berlin / Heidelberg, 2004, S. 105–119
- [294] SHOUP, Donald: Cruising for parking. In: *Transport Policy* 13 (2006), November, Nr. 6, S. 479–486
- [295] SIDHU, Bhavneet ; SINGH, Hardeep ; CHHABRA, Amit: Emerging Wireless Standards - WiFi, ZigBee and

- WiMAX. In: *Enformatika* 19 (2007), S. 308–
- [296] SODOUDI, Sahar: *Verifikation der EZMW-Niederschlagsprognose für den Iran*, Freien Universität Berlin, Diss., 2005
- [297] STAHL, Armin: *Learning of Knowledge-Intensive Similarity Measures in Case-Based Reasoning*, Technische Universität Kaiserslautern, Diss., 2004
- [298] STENNETH, Leon ; WOLFSON, Ouri ; YU, Philip S. ; XU, Bo: Transportation mode detection using mobile phones and GIS information. In: *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (GIS 11). – ISBN 978–1–4503–1031–4, S. 54–63
- [299] STRAHAN, R. ; MULDOON, C. ; O HARE, G.M.P. ; BERTOLOTTO, M. ; COLLIER, R. W.: An Agent-Based Architecture for Wireless Bus Travel Assistants. In: *PROCEEDINGS THE SECOND INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS INFORMATION SYSTEMS*, 2003
- [300] SUHAS, Mathur ; TONG, Jin ; NIKHIL, Kasturirangan ; JANANI, Chandrasekaran ; WENZHI, Xue ; MARCO, Gruteser ; WADE, Trappe: ParkNet: drive-by sensing of road-side parking statistics. In: *Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (MobiSys 10). – ISBN 978–1–60558–985–5, S. 123–136
- [301] SUN, Bin ; FAN, Fei ; LI, Jiang ; III, Legand L. B.: A Study on Routing Algorithm of Mass Transit. In: *Computer Science and Information Engineering, World Congress on 2* (2009), S. 686–690. ISBN 978–0–7695–3507–4
- [302] SUSSMAN, J.S.: *Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. Springer, 2005. – ISBN 9780387232577
- [303] THATCHER, Ulrich: Loose Octrees. In: DELOURA, Mark (Hrsg.): *Game Programming Gems*. Charles River Media, 2000, S. 444–453
- [304] THE SUSTAINABLE MOBILITY PROJECT: Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability / World Business Council for Sustainable Development. 2004. – Forschungsbericht
- [305] THIBAUT, William C. ; NAYLOR, Bruce F.: Set operations on polyhedra using binary space partitioning trees. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 21 (1987), August, Nr. 4, S. 153–162. – ISSN 0097–8930
- [306] THOMPSON, Paul M. ; PSARAFTIS, Harilaos N.: Cyclic transfer algorithms for multivehicle routing and scheduling problems. In: *Oper. Res.* 41 (1993), September, Nr. 5, S. 935–946. – ISSN 0030–364X
- [307] TOPP, Hartmut H.: Weniger Verkehr bei gleicher Mobilität. In: *Internationales Verkehrswesen* 46 (1994), Nr. 9, S. 486–493
- [308] TOUKABRI, Thouraya ; TSUKADA, Manabu ; ERNST, Thierry ; BETTAIEB, Lamjed: Experimental evaluation of an open source implementation of IPv6 GeoNetworking in VANETs. In: *ITST 2011 : 11th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications*. Saint-Petersburg, Russie, Fédération De, 2011
- [309] TREU, G. ; MARTENS, J. ; KÜPPER, A.: TraX - Eine Plattform zur Unterstützung ortsbezogener Community Dienste. In: *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation* 29 (2006), Mar, Nr. 1, S. 18–23
- [310] TRÖSTER, Christian: *Autonomes Fahren: Geister-Taxis ohne Chauffeur*. August 2011. – letzter Aufruf 31.10.2012
- [311] TSUKADA, Manabu: *Communications Management in Cooperative ITS*, Centre de Robotique, MINES ParisTech, France, Diss., 2011
- [312] TYAGI, M.: A Practical Method for Truck Dispatching Problems. In: *Journal of the Operations Research Society of Japan* 10 (1968), S. 76–92
- [313] UMWELTBUNDESAMT: *Energiebedingte CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahr 2009: Verkehr im Vergleich zu anderen Quellgruppen*. 2011. – letzter Aufruf 30.08.2012
- [314] UN-HABITAT: *The Millenium Development Goals and Urban Sustainability: 2006/2007*. 2006
- [315] UN-HABITAT: *Harmonious Cities: 2008/2009*. 2008
- [316] UN-HABITAT: *Global Urban Economic dialogue series*. 2012. – ISBN Series Number: 978-92-1-132027-5 ISBN: 978-92-1-132361-0
- [317] URBANTEC: *Smart technologies for better cities*. 2012
- [318] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN: *Busse & Bahnen für eine Nachhaltige Mobilität*. June 2010
- [319] WANG, Shuangquan ; CHEN, Canfeng ; MA, Jian: Accelerometer Based Transportation Mode Recognition on Mobile Phones. In: *Wearable Computing Systems, Asia-Pacific Conference on 0* (2010), S. 44–46. ISBN 978–0–7695–4003–0
- [320] WAPPELHORST, Sandra: *Mobilitätsmanagement in Metropolregionen*, Universität der Bundeswehr München, Diss., 2011
- [321] WEBSTER, Richard ; OLIVER, Margaret A.: *Geostatistics for Environmental Scientists*. 2. Chichester : John

- Wiley & Sons, Ltd and Wiley, 2007. – ISBN 9780470028582
- [322] WEERTH, Ingo Carsten und M. Carsten und Mecke: *Stichwort: Kooperation, online im Internet*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/7992/kooperation-v8.html>. – letzter Aufruf 31.01.1013
- [323] WEGE, A.: *Video-Überwachungstechnik: CCTV-Handbuch für Planer, Berater und Anwender*. Hüthig, 2000 (W-&-S-Praxiswissen). – ISBN 9783778527672
- [324] WEISS, Diana ; DUCHON, Markus ; FUCHS, Florian ; LINNHOFF-POPIEN, Claudia: Context-Aware Personalization for Mobile Multimedia Services. In: *6th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia*. Linz, Austria, 2008
- [325] WEST, Douglas B.: *Introduction to graph theory*. Prentice Hall, 2001. – ISBN 9780130144003
- [326] WIESNER, Kevin ; DUCHON, Markus ; DÜRR, Michael: Private Pooling: Privacy for Mobile Collaborative Sensing. In: *3rd International Conference on Security and Privacy in Mobile Information and Communication Systems*. Aalborg, Denmark, 2011
- [327] WIESNER, Kevin ; DUCHON, Markus ; DÜRR, Michael: Distributed Multi-Head Clustering for People-Centric Sensor Networks. In: *6th International Conference on Sensor Technologies and Applications*. Rome, Italy, 2012
- [328] WINTER, Stephan ; NITTEL, Silvia: Ad-hoc Shared-ride Trip Planning by Mobile Geosensor Networks. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SCIENCE* 20 (2006), S. 899–916
- [329] WREN, A. ; HOLLIDAY, A.: *Computer Scheduling of Vehicles from One Or More Depots to a Number of Delivery Points*. University of Leeds, Centre for Computer Studies, Operational Research Unit, 1972
- [330] WREN, Anthony: *Computers in transport planning and operation*. Allan, Shepperton, 1971. – 152 p.; S. – ISBN 0711002355
- [331] XIANG, Zhihai ; CHU, Chengbin ; CHEN, Haoxun: The study of a dynamic dial-a-ride problem under time-dependent and stochastic environments. In: *European Journal of Operational Research* 185 (2008), Nr. 2, S. 534 – 551. – ISSN 0377–2217
- [332] YANG, Yu-Cieh ; TODA, Tatsuo ; HONG, Chin-Ming: Transportation Prediction Using Build-In Triaxial Accelerometer in Cell Phone. In: *BAI 10: 7th International Conference on Business and Information*, 2010
- [333] ZACKOR, Heinz ; GROKE, Roland ; FROESE, Jens ; HANDKE, Norbert ; PACHL, Jörn ; REICHMUTH, Johannes ; RINGENBERGER, Ralf ; ULLMER, Siylvia ; ZIGIC, Branislav: *Stand der Verkehrstelematik in Deutschland im europäischen Vergleich*. 2003
- [334] ZETSCHKE, Dr. D. ; FLEIG, Günther ; GRUBE, Dr. R. ; RENSCHLER, Andreas ; UEBBER, Bodo ; WEBER, Dr. T.: *Car2Go*. <http://www.car2go.com/portal/page/home.faces>, 2008
- [335] ZHENG, J. ; WINSTANLEY, A.C. ; YAN, L. ; FOTHERINGHAM, A.: Economical LBS for Public Transport: Real-time Monitoring and Dynamic Scheduling Service. In: *International Conference on Grid and Pervasive Computing* 0 (2008), S. 184–188. ISBN 978–0–7695–3177–9